

Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Matthias Nendza
aus Essen

Eingereicht am	9. Juli 2006
Mündliche Prüfung am	21. Dezember 2006

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann Prof. Dr.-Ing. S. Savidis
------------------	--

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig. Die Forschungsaktivität auf dem Gebiet der Rütteldruckverdichtung wurde unterstützt durch die Keller Grundbau GmbH, namentlich durch Dr. J. Wehr dessen hilfreiche Denkanstöße zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Im Rahmen des Promotionsverfahrens danke ich Professor Rolf Leutner für den Vorsitz der Prüfungskommission und Professor Peter Renken für die Übernahme der Funktion des Prüfers. Dank gebührt zudem Professor Stavros Savidis, der die Tätigkeit des zweiten Berichterstatters übernommen hat. Herrn Professor Joachim Stahlmann danke ich für die Übernahme der Berichterstattung und die Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit.

Bei der Durchführung und Auswertung der umfangreichen Untersuchungen meiner Arbeit waren mir Mitarbeiter und studentische Hilfskräfte des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik behilflich. Namentlich sei den technischen Mitarbeitern Herrn Eckhard Feistel und Herrn Henning Lührich und den studentischen Hilfskräften Benedikt Bruns, Ingmar Strietzel und Nikolas Rottmann gedankt. Dank für die mühevollen Arbeit des Korrekturlesens und die intensiven fachlichen Diskussionen gebührt meinen Freunden Fabian Kirsch und Matthias Schallert.

Meiner Mutter und meinem im Jahr 2002 verstorbenen Vater danke ich an dieser Stelle herzlich für die immerwährende Unterstützung auf meinem beruflichen Weg. Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Nicole für die unermüdliche Geduld und das Verständnis während der Arbeit an der Dissertation.

Aachen, im Mai 2007

Matthias Nendza

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung in die Fragestellung	1
1.2	Ziele und Struktur der Arbeit	2
2	Stand der Technik und Forschung	4
2.1	Übersicht über die Bodenverbesserungsverfahren	4
2.2	Tiefenverdichtung durch das Rütteldruckverfahren (RDV)	5
2.2.1	Allgemeines und Grundlagen	5
2.2.2	Verfahrens- und Gerätetechnik	7
2.2.3	Einflussgrößen auf die Verdichtung bei Anwendung des RDV	10
2.2.4	Anwendungsgrenzen für das RDV	11
2.2.5	Verfüllmaterial	12
2.2.6	Reichweite und Ausführungsraaster	13
2.2.7	Verdichtungskontrollen und Überwachung	16
2.3	Analytische Modelle zur Beschreibung der Rütteldruckverdichtung	18
2.3.1	Grundlagen und Terminologie	18
2.3.1.1	Ersatzsysteme	18
2.3.1.2	Dämpfung	20
2.3.1.3	Übertragungsfunktion	23
2.3.1.4	Wellenausbreitung im Boden	25
2.3.2	Analytische Modellansätze	27
2.3.2.1	Fundamentmodell	28
2.3.2.2	Pfahlmodell	31
2.3.2.3	Vergleich von Fundament- und Pfahlmodell	33
2.3.2.4	Bodenreaktionskraft	34
2.4	Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung durch das RDV	35
2.4.1	Bodenverflüssigung	36
2.4.2	Resonanzerscheinungen in der dynamischen Bodenverdichtung	38
2.4.2.1	Modell der mitschwingenden Bodenmasse	40
2.4.2.2	Einflussfaktoren auf die Resonanzfrequenz	41
2.4.2.3	Untersuchungen zu Resonanzzuständen mit Tiefenrüttlern	43
2.5	Aktive Regelung von dynamischen Bodenverdichtungssystemen	45

2.5.1	Mess- und Regelungstechnik der Oberflächenverdichtungs-systeme	45
2.5.2	Müller-Resonance-Compaction (MRC)	47
3	Modellversuche zur Untersuchung der bodendynamischen Mechanismen der Tiefenverdichtung	49
3.1	Zielsetzung und Methodik	49
3.2	Modelltheorie	50
3.3	Versuchseinrichtung	51
3.3.1	Aufbau und Konzeption des Versuchsstandes.....	51
3.3.2	Modelltiefenrüttler.....	53
3.3.3	Bodenmechanische Parameter des Modellsandes	55
3.3.4	Einbau des Modellsandes	56
3.3.5	Messtechnik	57
3.4	Versuchsdurchführung.....	63
3.5	Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse	66
3.5.1	Rüttlerbewegung	68
3.5.2	Erzielte Verdichtung	74
3.5.3	Verdichtungsreichweite	80
3.5.4	Setzungsmessungen.....	81
3.5.5	Motorleistung.....	83
3.5.6	Porenwasserdruckmessung und Bodenverflüssigung.....	84
3.5.7	Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System.....	90
3.5.8	Intervallziehen des Modellrüttlers.....	95
3.6	Zusammenfassung der Erkenntnisse	98
4	Analytische Berechnung	101
4.1	Bodendynamische Kennwerte des Modellsandes	102
4.2	Prognoseberechnung.....	105
4.2.1	Eingangsparameter Modellrüttler	105
4.2.2	Berechnungsablauf	106
4.2.3	Berechnungsbeispiel für den Modellrüttler	109
4.3	Vergleich der analytischen Berechnungen mit den Ergebnissen der Modellversuche.....	113
4.3.1	Modellparameter Federsteifigkeit und Dämpfung.....	113
4.3.2	Rüttleramplitude und Lagerungsdichte.....	117

4.3.3	Indikatordiagramm für den Tiefenrüttler	121
4.3.4	Bewertung von Systemresonanzen im Rüttler-Boden-System.....	124
4.4	Vergleichsberechnung für einen Tiefenrüttler in situ.....	125
4.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse	128
5	Zusammenfassung.....	129
6	Ausblick	131
7	Literatur.....	132
8	Symbole	140

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Fragestellung

Die Gründung von Bauwerken in nicht bindigen Böden mit geringer oder ungleichmäßiger Lagerungsdichte führt zu Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen, die das bauwerksverträgliche Maß deutlich überschreiten können. Die Abtragung der Bauwerkslasten kann entweder durch eine konventionelle Tiefgründung oder geeignete Bodenverbesserungsmaßnahmen erfolgen. Je nach Größe der Gründungsfläche und Kubatur des maßgeblichen Baugrundes, kann die Bodenverbesserung bei dieser Aufgabenstellung eine wirtschaftliche Alternative darstellen. Die Bodenverdichtung ist in diesem Zusammenhang als eine in der Geotechnik sehr häufig angewandte Methode der Bodenverbesserung zu nennen.

Nicht bindige Böden wie Sande und Kiese lassen sich im Gegensatz zu bindigen Böden durch statische Kompression kaum verdichten. Eine effiziente Verdichtung wird durch wiederholte Scherung erzielt, wie sie bei der dynamischen Bodenverdichtung erzeugt wird. Besonders für Verdichtungstiefen von mehr als zwei Metern, ist die dynamische Bodenverdichtung mittels Tiefenrüttler ein leistungsfähiges und flexibles Verfahren. Diese Eigenschaften haben zusammen mit der im Vergleich zur Tiefgründung kostengünstigen Durchführung zu einer weiten Verbreitung des Tiefenverdichtungsverfahrens beigetragen.

Bei der dynamischen Tiefenverdichtung durch das Rütteldruckverfahren entstehen vertikale Zonen mit einer gleichmäßigen und hohen Lagerungsdichte. Die erzielte Dichteerhöhung im Boden und der Wirkungsradius des Tiefenrüttlers werden von einer Vielzahl von Maschinen- und Bodenparametern beeinflusst. Die theoretische Beschreibung der bodendynamischen Mechanismen der Rütteldruckverdichtung stellt sich komplex dar, da sich die maßgeblichen Bodenparameter während des Verdichtungs Vorganges fortlaufend ändern. Das Materialverhalten des Bodens ist durch die großen Scherdehnungen im Zuge der dynamischen Verdichtung stark nichtlinear. Aus Mangel an analytischen Bemessungsverfahren erfolgt die Festlegung der Produktionsparameter heute in der Ausführung weitestgehend auf empirischer Basis bzw. auf der Grundlage von projektspezifischen Verdichtungsversuchen. Der Einfluss der Maschinenparameter wie z. B. Rüttlerfrequenz, Unwuchtmasse oder Schwingungsamplitude auf die

Verdichtungsleistung und insbesondere auf die Verdichtungsreichweite ist bisher unter definierten und reproduzierbaren Randbedingungen noch nicht ausreichend untersucht worden.

Bei der dynamischen Oberflächenverdichtung ist es mittlerweile Stand der Technik, dass die Maschinenparameter während des laufenden Verdichtungsprozesses durch eine aktive Steuerung angepasst werden können, um somit eine optimale Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Verdichtung zu erzielen. Eine solche Steuerungstechnik steht für die dynamische Tiefenverdichtung bisher nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wird bei der Ausführung der Rütteldruckverdichtung oft vereinfachend mit einer konstanten Rüttlerfrequenz gearbeitet, auch wenn hierdurch nicht immer ein optimaler Verdichtungserfolg gewährleistet werden kann. Für die Rütteldruckverdichtung sind bisher keine Grundlagenuntersuchungen durchgeführt worden, die als Basis für die Entwicklung einer aktiven Steuerungstechnik dienen können.

1.2 Ziele und Struktur der Arbeit

Das vorrangige Ziel der Arbeit ist es, einen Beitrag zur Schließung der vorhandenen Wissenslücken in Bezug auf die Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung des Rütteldruckverfahrens und deren Abhängigkeit von den Betriebs- und Verfahrensparametern zu leisten. Für die Erfassung und Beschreibung der dynamischen Bodenverdichtungsmechanismen ist es unabdingbar, die Interaktion zwischen Rüttler und Boden zu betrachten. Das Schwingen des Rüttlers im Boden bedingt eine signifikante Dichte- und Steifigkeitserhöhung des Bodens, die wiederum zu einer Einspannung des Rüttlers führt. Hierdurch werden die Rüttleramplitude und der Energieeintrag in den umgebenen Boden wesentlich beeinflusst. Im Rahmen dieser Arbeit werden die genannten Interaktionen in Versuchsserien mit einem Modelltiefenrüttler unter definierten Randbedingungen in einem Versuchsstand untersucht. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für die Ausführungspraxis gegeben.

In Kapitel 2 werden zunächst der Stand der Technik der Rütteldruckverdichtung, der Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung und die analytischen Ersatzmodelle des Verfahrens erläutert.

Die in Kapitel 3 beschriebenen Modellversuche werden mit dem Ziel der Betrachtung von drei zentralen Themengruppen durchgeführt:

- Die Frequenz und die Unwuchtmasse des Tiefenrüttlers stellen die wesentlichen, beeinflussbaren Parameter bei der Rütteldruckverdichtung dar. Durch die Variation dieser Parameter wird sowohl die erzielbare Verdichtungsleistung, als auch die räumliche Ausbildung der verdichteten Bereiche im Boden untersucht.
- Resonanzerscheinungen führen auch in der Bodendynamik zu deutlichen Amplitudenvergrößerungen und können die Leistungsfähigkeit eines Verdichtungsgerätes steigern. Ob und unter welchen Randbedingungen Resonanzerscheinungen bei der Rütteldruckverdichtung gezielt herbeigeführt werden können, wird im zweiten Teil der Modellversuche analysiert.
- Ein wesentlicher Mechanismus der Rütteldruckverdichtung von nicht bindigen, wassergesättigten Böden ist die Bodenverflüssigung. Ein wichtiger Indikator hierfür ist neben der Kornumlagerung die Veränderung der Porenwasserdrücke. Diese werden in der dritten Versuchsserie in Abhängigkeit von den Betriebsparametern des Rüttlers untersucht.

Eine Messtechnik im Modellrüttler und im Versuchsstand dient der Erfassung der Rüttlerbeschleunigung, der Rüttleramplitude und der Porenwasserdrücke im Modellsand. Im Kapitel 3 folgt eine ausführliche Darstellung und Analyse der Versuchsergebnisse. Auf dieser Grundlage werden die analytischen Berechnungsansätze verifiziert und in der Folge modifiziert.

In Kapitel 5 werden die Schlussfolgerungen aus den gewonnenen Ergebnissen zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf eine aktive Mess- und Regelungstechnik von Tiefenrüttlern gegeben.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Übersicht über die Bodenverbesserungsverfahren

Genügt ein Baugrund den Anforderungen nicht, um die einwirkenden Lasten einer geplanten Baumaßnahme unter Berücksichtigung eines tolerierbaren Setzungsbetrages abzutragen, ist es erforderlich, eine Tiefgründung herzustellen oder geeignete Bodenverbesserungsmaßnahmen durchzuführen. Eine Tiefgründung gewährleistet in der Regel die gewünschte Lastabtragung auf einem hohen Sicherheitsniveau, stellt aber häufig nicht die wirtschaftlichste Lösung dar. Eine Baugrundverbesserung ist immer dann vorzusehen, wenn der anstehende Baugrund mit Hilfe entsprechender Methoden und vertretbarem Aufwand in einen Zustand versetzt werden kann, der den Anforderungen genügt. Es steht eine große Anzahl technischer Verfahren zur Verfügung, mit denen in Abhängigkeit von der Ausgangssituation eine zielführende Baugrundverbesserung erreicht werden kann. Im Allgemeinen erfolgt eine solche Maßnahme durch Austausch, Verfestigung oder Verdichtung des anstehenden Baugrundes.

Der Austausch eines für den Gründungszweck nicht geeigneten Bodens durch ein tragfähigeres Material erfolgt in der Regel nur bis in eine Tiefe von wenigen Metern. Mit zunehmendem Volumen des auszutauschenden Bodens wird diese Methode jedoch unwirtschaftlich. Die Bodenverfestigung basiert auf einer Reduktion der Verschieblichkeit der Bodenteilchen untereinander und kann bis in große Tiefen erfolgreich angewendet werden.

Bei der Verdichtung des Baugrundes können sowohl statische, als auch dynamische Verfahren zum Einsatz kommen. Mit dynamischen Oberflächenverdichtungsverfahren können Wirkungstiefen von bis zu 1,5 m erzielt werden (FLOSS, 1986). Unter dem Begriff der Tiefenverdichtung fallen alle Verfahren, die sich zur Verdichtung des Bodens ab einer Tiefe von 2,0 m eignen. Dazu zählen ebenfalls die dynamische Intensivverdichtung, die Sprengverdichtung sowie Verdichtungspfähle. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Focus auf die dynamische Verdichtung mittels Tiefenrüttlern gerichtet. In Bild 2.1 ist eine Übersicht über die Verfahren der Baugrundverbesserung gegeben. Weitere Beschreibungen der genannten Verfahren sind z.B. in (KIRSCH, SONDERMANN, 2001) zu finden.

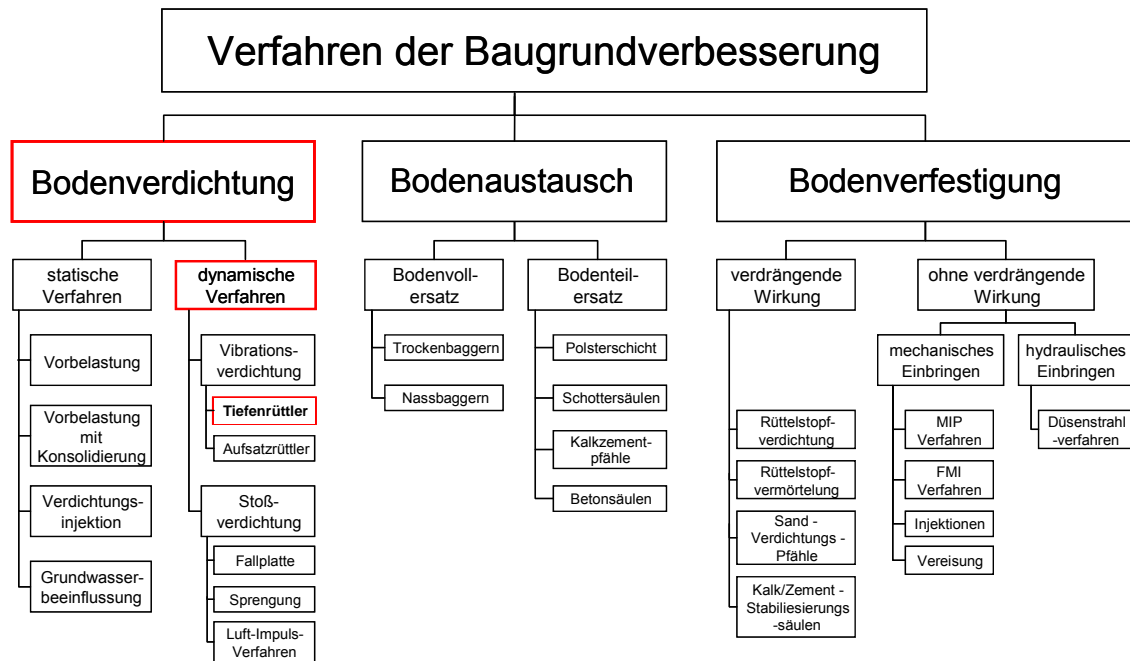


Bild 2.1: Übersicht der Baugrundverbesserungsverfahren nach KIRSCH (2004)

2.2 Tiefenverdichtung durch das Rütteldruckverfahren (RDV)

2.2.1 Allgemeines und Grundlagen

Bei der dynamischen Verdichtung nicht bindiger Böden wird die Reibung zwischen den Bodenkörnern durch Vibration so stark verringert, dass es unter dem Eigengewicht zu einer Kornumlagerung in einen Zustand höherer Dichte kommt. Die damit einhergehende Volumenverminderung hängt von der Bodenbeschaffenheit, der eingesetzten Rüttelenergie und der Einwirkungsdauer ab. Liegt eine vollständige Wassersättigung des Bodens vor, kann durch die dynamische Einwirkung eine Verflüssigung des Bodens erzeugt werden. Die einwirkenden Schwingungen bewirken einen Anstieg des Porenwasserdruckes bis die effektiven Spannungen zwischen den Bodenkörnern aufgehoben werden und der Boden mit einer deutlich geringeren Energie in eine dichtere Lagerung gebracht werden kann. Eine Bodenverflüssigung stellt sich jedoch nur ein, wenn die hierfür erforderlichen Randbedingungen gegeben sind. Begünstigend wirken eine lockere Lagerungsdichte, Wassersättigung und eine runde Kornform. Die Mechanismen der Bodenverflüssigung werden im Kapitel 2.4.1 dargestellt.

Die dynamische Bodenverdichtung mit Tiefenrüttlern wird seit über 60 Jahren zur Verbesserung der Tragfähigkeit von nicht bindigen Böden eingesetzt. Die Firma Johann

Keller entwickelte in den 1930er Jahren das Verfahren und meldete es 1936 zum Patent an (KIRSCH, 1993). Das anfänglich noch aufwendige Verfahren wurde rasch weiterentwickelt und verfahrenstechnisch modifiziert. In den folgenden Jahrzehnten hat sich das Rütteldruckverfahren auf Grund seiner hohen Flexibilität und Wirtschaftlichkeit in der Reihe der Bodenverbesserungsverfahren fest etabliert (GREENWOOD, 1972).

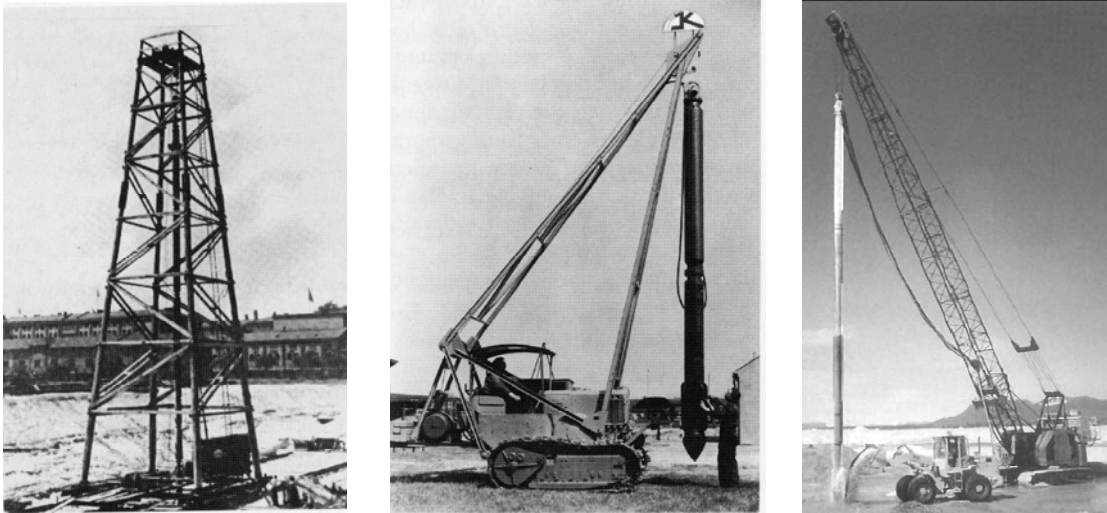


Bild 2.2: Entwicklung der Tiefenverdichtung aus KIRSCH (1993) und BAUER (2004)

Heute kommen bei der dynamischen Bodenverbesserung mittels Tiefenrüttlern im Wesentlichen das Rütteldruckverfahren (RDV) und das Rüttelstopfverfahren (RSV) zur Anwendung. Die DIN EN 14731 (2005-12) fasst beide Verfahrensweisen unter dem Begriff „Vibroverdichtung“ zusammen. Während das Rüttelstopfverfahren überwiegend in bindigen Böden genutzt wird, beschränkt sich die Anwendung des Rütteldruckverfahrens auf nicht bindige Böden.

Der Einsatz der Rütteldruckverdichtung erfolgt hauptsächlich in Böden mit einer geringen oder ungleichmäßigen Lagerungsdichte, die als Baugrund ohne weitere Maßnahmen nicht geeignet sind. Durch die Verdichtung wird das Last-Setzungsverhalten des Bodens nachhaltig verbessert und vergleichmäßigt. Aus bodenmechanischer und hydrogeologischer Sicht wird einhergehend mit der Dichteerhöhung die Scherfestigkeit und der Steifemodul des Bodens erhöht und die Durchlässigkeit verringert (WELSCH, 1987). Hieraus folgen eine Verringerung der Setzungen und eine Erhöhung der Grundbruchsicherheit. Für den Lastfall Erdbeben wird bei locker gelagerten sandigen Böden die Verflüssigungsneigung reduziert (KIRSCH, SONDERMANN, 2001).

2.2.2 Verfahrens- und Gerätetechnik

Das wesentliche Element der RDV ist der Tiefenrüttler, dessen Gehäuse aus einem Stahlzylinder mit etwa 0,25 m bis 0,45 m Durchmesser und 2,5 m bis 4,5 m Länge besteht. Je nach Art und Größe des Rüttlers variiert das Gewicht von 800 kg bis zu 4000 kg. Im unteren Teil des Rüttlers befinden sich eine oder mehrere rotierende Unwuchtmassen, die über eine gemeinsame Welle mit dem Antriebsmotor im oberen Teil verbunden sind und somit den Rüttler in die gewünschte horizontale Schwingung versetzen. Die Rüttelenergie kann so über das Mantelrohr direkt auf den umgebenden Boden einwirken und ist dabei unabhängig von der Tiefenlage des Gerätes. Mittels Verlängerungsrohren kann das Gerät auf die erforderliche Länge gebracht werden. Eine elastische Kupplung dient der Entkopplung der Rüttlerbewegung, so dass die Schwingungsübertragung auf die Verlängerungsrohre minimiert wird (KIRSCH, SONDERMANN, 2001).

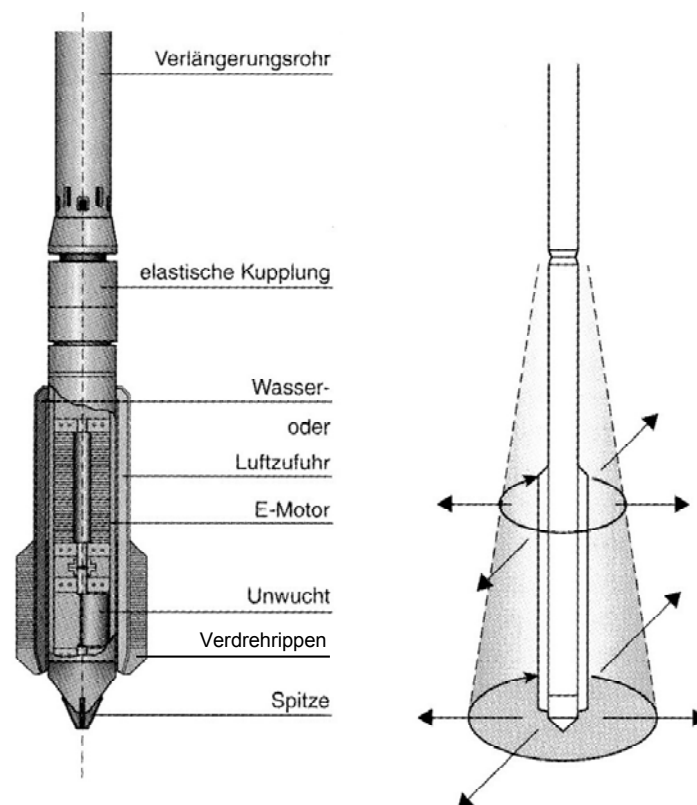


Bild 2.3: Aufbau und Kinematik eines Tiefenrüttlers aus KIRSCH, SONDERMANN (2001)

Ein Verdrehen des Rüttlers im Boden wird durch die Verdrehrippen unterbunden (Bild 2.3). Typische Schwingfrequenzen liegen zwischen 25 Hz und 60 Hz, wodurch Flieh-

kräfte der Unwuchtmasse von 150 kN bis zu 700 kN in den Boden induziert werden können. Die dem Boden durch den Rüttler aufgeprägte Frequenz verringert sich in der Regel um ca. 5 %. Grund hierfür ist der so genannte Schlupf bei Asynchronmotoren (WEHR, SONDERMANN, 2003). Die horizontalen Schwingungen des Rüttlers können ohne seitliche Behinderung Schwingweiten zwischen 10 mm und 50 mm an der Rüttlerspitze erreichen. Die dabei auftretende Beschleunigung nimmt Werte von bis zu 400 m/s^2 an. Ein signifikanter Verdichtungsprozess wird bereits ab einer Beschleunigung von etwa $0,05 \text{ m/s}^2$ eingeleitet (ROGERS, 1979).

Der Antrieb des Tiefenrüttlers erfolgt über einen elektrisch oder hydraulisch betriebenen Motor, dessen Leistung in der Regel zwischen 50 kW und 150 kW, in Ausnahmefällen auch bis zu 200 kW beträgt. Zur Reduktion des Eindringwiderstandes in den Boden befinden sich an der Rüttlerspitze, im Bereich der Kupplung oder mitunter auch an anderer Stelle der Verlängerungsrohre Öffnungen, aus denen Wasser oder Luft unter Druck ausgespresst wird (GREENWOOD, 1972).

Das Verfahren der Rütteldruckverdichtung lässt sich grundsätzlich in die in Bild 2.4 gezeigten Arbeitsschritte gliedern:

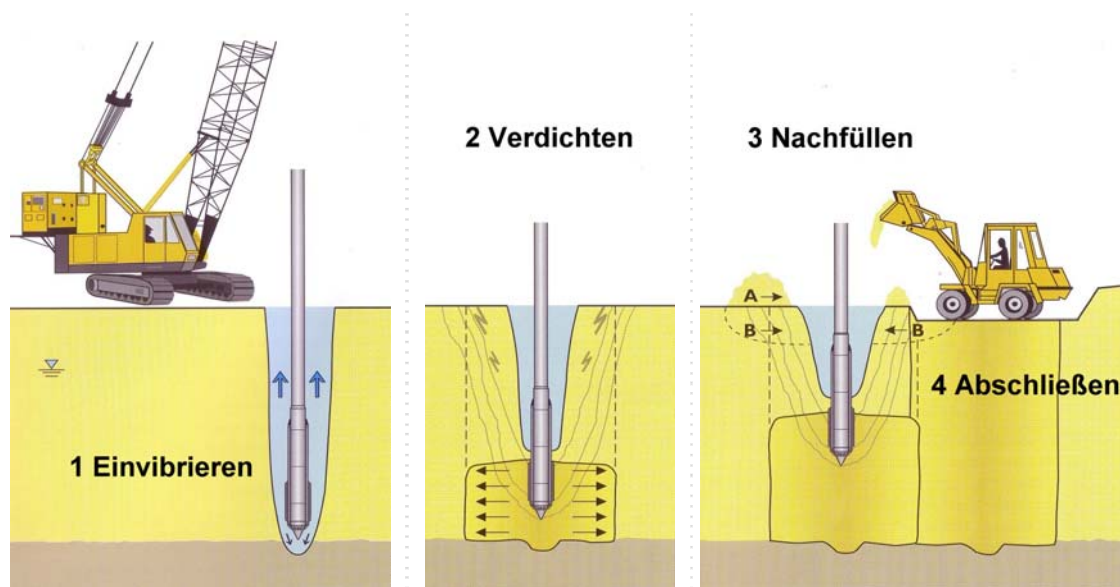


Bild 2.4: Verfahrensweise der Rütteldruckverdichtung aus Keller (2004)

1. Einvibrieren

Der Rüttler dringt unter ständigem Vibrieren mit einer Sinkgeschwindigkeit von ca. 0,3 m/s bis 0,1 m/s bis zur geplanten Tiefe in den Boden ein. Allein durch sein Eigengewicht und das der Aufsatzrohre wird der Versenkprozess sichergestellt, der durch die Spülkraft des an der Rüttlerspitze austretenden Mediums, Wasser oder Luft, beschleunigt werden kann. Hat der Tiefenrüttler die gewünschte Tiefe erreicht, so werden die Eindringhilfen in der Regel abgeschaltet oder zumindest stark reduziert.

2. Verdichten

Die Bodenverdichtung erfolgt stufenweise von unten nach oben, wobei der Rüttler für einen definierten Zeitraum, in der Regel zwischen 30 s und 90 s, in einer konstanten Tiefe gehalten wird, bevor er anschließend in die nächste Tiefenstufe um 0,5 m bis 1,0 m angehoben wird (WEHR, SONDERMANN, 2003).

3. Nachfüllen

Als Folge der Verdichtung des Bodens bildet sich im oberflächennahen Bereich um den Rüttler ein Absenktrichter. Die entstehende Absenkung Δh an der Oberfläche kann je nach Anfangsdichte und Verdichtungsgrad zwischen 5 % und 15 % der Verdichtungstiefe betragen (KIRSCH, SONDERMANN, 2001). Zum Verfüllen des entstehenden Hohlraumes werden entweder angefahrne Materialien wie Sande, Kiese oder Sand-Kies-Gemische, die dem anstehenden Boden gleichen, verwendet oder in Ausnahmefällen das an der Geländeoberfläche vorhandene Material in den Absenktrichter befördert. Durch das Verfüllen des Absenktrichters wird zudem der Kontakt zwischen Boden und Rüttler sichergestellt, der für die Kraftübertragung notwendig ist. Verliert der Rüttler den Kontakt zum Boden, kann keine Verdichtungsenergie mehr übertragen werden.

4. Abschließen

Der oberflächennahe Bereich bis zu einer Tiefe von rund 0,5 m lässt sich durch das Rütteldruckverfahren nicht ausreichend verdichten (KIRSCH, SONDERMANN, 2001), da die vertikale Auflast durch das Eigengewicht der Bodenkörner im Verhältnis zu der dynamischen Einwirkung durch den Tiefenrüttler gering ist. Mit einem geeigneten Oberflächenverdichtungsverfahren, beispielsweise einer Vibrationswalze, wird die Oberfläche nachverdichtet.

2.2.3 Einflussgrößen auf die Verdichtung bei Anwendung des RDV

Die langjährigen Erfahrungen mit der Rütteldruckverdichtung belegen, dass die technischen Ziele dieses Verfahrens, also die Verdichtung des anstehenden Bodens bis zu einer gewünschten Lagerungsdichte, grundsätzlich erreicht werden können. Die Verdichtungseffizienz bzw. Arbeitsleistung während der Ausführung und damit die Wirtschaftlichkeit kann jedoch in Abhängigkeit von den Verfahrensparametern und Randbedingungen in situ stark schwanken.

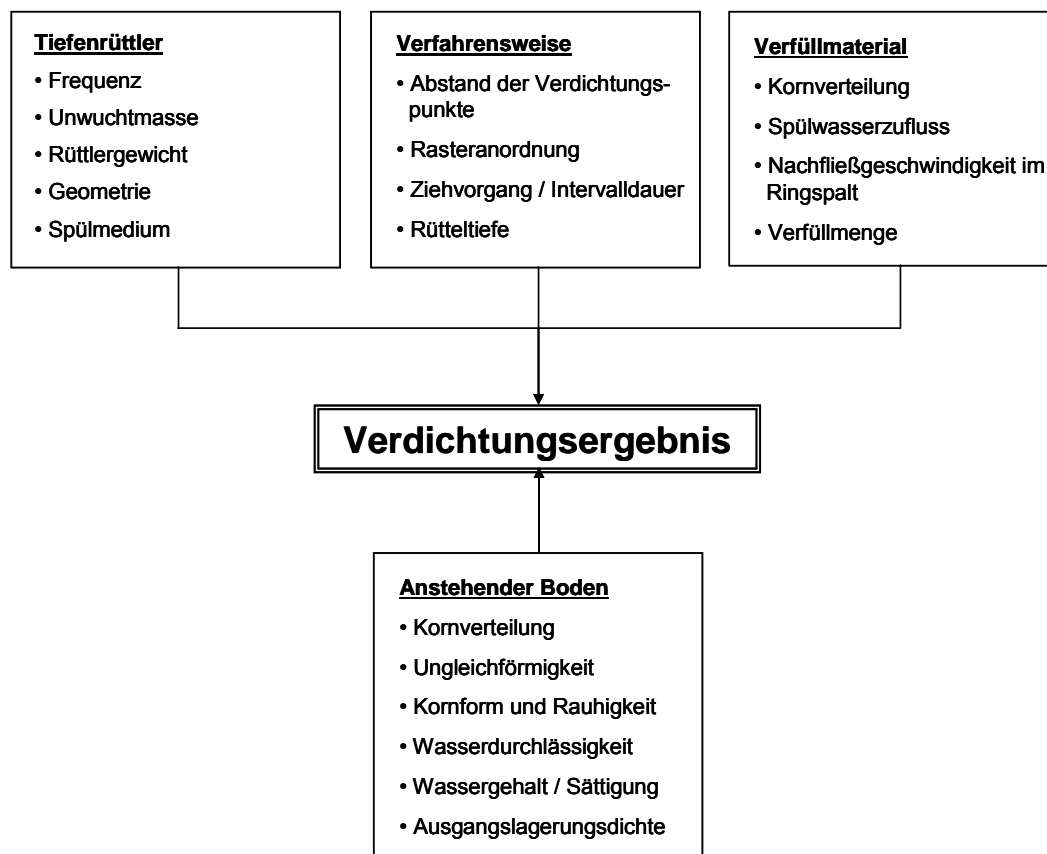


Bild 2.5: Einflussgrößen auf das Verdichtungsergebnis bei der Rütteldruckverdichtung

Es gibt nach wie vor offene Fragestellungen in Bezug auf die bodendynamischen Mechanismen der Rütteldruckverdichtung und die Beeinflussung der Verdichtungsleistung durch die Verfahrensparameter. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass die Beschreibung und rechnerische Abbildung der dynamischen Tiefenverdichtung sehr aufwendig ist und zudem von einer großen Anzahl von Einflussgrößen bestimmt wird. Während des Verdichtungsvorganges ändern sich durch die Dichte- und Steifigkeitserhöhung zudem die Randbedingungen der Rüttler-Boden-Interaktion. Maßgeblichen Einfluss auf die Verdichtung haben der Rüttler und seine Betriebsparameter, der Arbeitsablauf, die

Eigenschaften und Zustandsform des zu verdichtenden Bodens sowie das verwendete Verfüllmaterial (Bild 2.5).

Vor dem Hintergrund der großen Anzahl von Einflussgrößen auf die Rüttler-Boden-Interaktion, ist ein Bemessungsverfahren für dieses Verfahren wünschenswert. Dieses konnte jedoch wegen der in situ stark schwankenden bodendynamischen Bodeneigenschaften und der Schwierigkeit, deren Einfluss auf den Verdichtungsprozess zu bewerten, bisher nicht entwickelt werden. Zudem stehen den ausführenden Firmen die dynamischen Bodenkennwerte in der Regel nicht zur Verfügung. Die Maschinen- und Verfahrensparameter werden deshalb nach wie vor auf empirischer Basis festgelegt. Hieraus leitet sich der Forschungsbedarf ab, die Rüttler-Boden-Interaktion und den Einfluss der Verfahrensparameter auf das Verdichtungsergebnis wissenschaftlich zu untersuchen.

2.2.4 Anwendungsgrenzen für das RDV

Für die Bewertung der Verdichtungsfähigkeit eines Baugrundes mit dem Rütteldruckverfahren ist die Berücksichtigung einer Vielzahl von Bodeneigenschaften erforderlich. Die Verdichtungsfähigkeit ist sowohl von der Kornverteilung (bzw. deren Abstufung), als auch von dem Sättigungszustand des Bodens abhängig. Die Kornform und die Kornrauigkeit bestimmen ebenfalls die Strukturfestigkeit des Bodens und damit das Umlagerungsvermögen bei dynamischer Einwirkung. Der Anwendungsbereich der Rütteldruckverdichtung erstreckt sich im Allgemeinen auf Kiese und Sande mit einem Feinkornanteil unter 10 % und einem Tonanteil kleiner als 5 % (Bild 2.6). Auf Grund der kohäsiven Eigenschaften ist bei Schluff und Ton die Umlagerung der Bodenteilchen erschwert. Die bindigen Bodenpartikel bedingen zudem eine stärkere Dämpfung der Schwingungen. Beide Vorgänge wirken sich nachteilig auf die Verdichtung aus.

Die FGSV (1979) gibt in ihrem Merkblatt an, dass das Rütteldruckverfahren grundsätzlich für die Verdichtung von grob- und gemischtkörnigen Böden mit Steinen bis zu einem Durchmesser nicht größer als 100 mm geeignet ist. Nach BROWN (1977) lässt sich locker gelagerter Sand im Grundwasser besonders gut verdichten. Dies ist auf das Phänomen der Bodenverflüssigung zurückzuführen, welches im Kapitel 2.4.1 beschrieben wird.

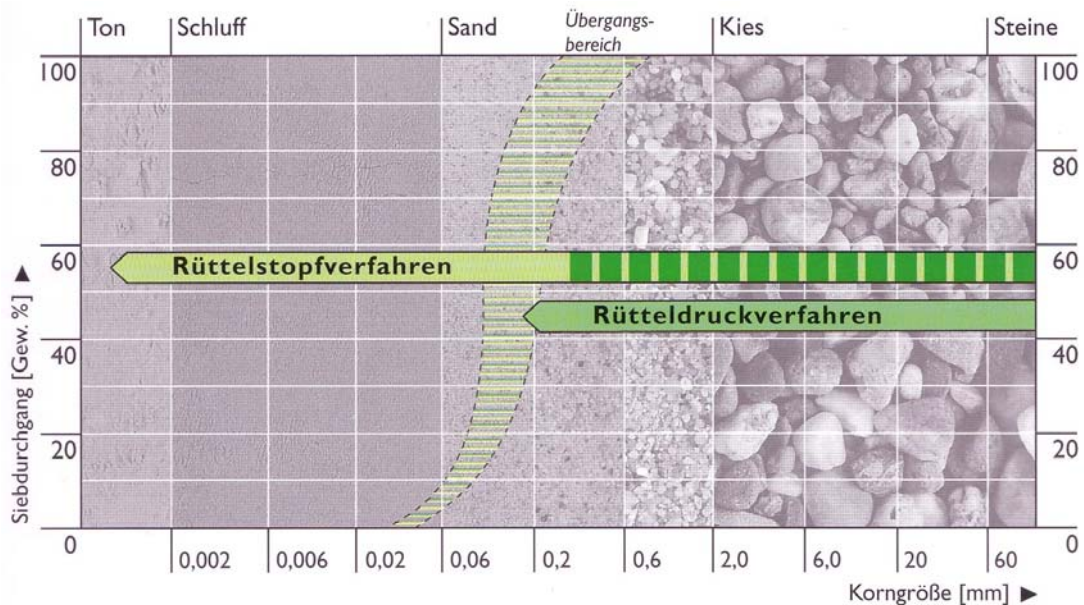


Bild 2.6: Anwendungsgrenzen der Tiefenrüttelverfahren aus KELLER (2004)

Das Verfahren kann sowohl über als auch unterhalb des Grundwasserspiegels angewendet werden. Wirtschaftlich kann in einer Tiefe zwischen 3 m und 25 m gearbeitet werden. Mit modernen Rüttlersystemen sind auch Tiefen bis zu 50 m möglich (WEHR et al., 2005).

2.2.5 Verfüllmaterial

Das an der Oberfläche lagernde Verfüllmaterial wird unter Verwendung von Wasser in den entstehenden Absenktrichter gespült, um somit den permanenten Kontakt zwischen Rüttler und dem umgebenden Boden sicherzustellen. Das Verfüllmaterial soll entlang der Verlängerungsrohre und des Rüttlermantels bis zur Rüttlerspitze nachfließen. Um dieses zu gewährleisten, dürfen die Einzelkörner weder zu grob sein, weil sie sich sonst verkeilen und den Materialstrom behindern könnten, noch dürfen die Körner zu fein sein, da diese sonst im Spülwasser nicht absinken. Als Verfüllmaterial sollte ein Mittel- bis Grobsand verwendet werden. BROWN (1977) gibt eine Eignungszahl E zur Bewertung von Verfüllmaterial an:

$$E = 1,7 \cdot \sqrt{\frac{3}{(d_{50})^2} + \frac{1}{(d_{20})^2} + \frac{1}{(d_{10})^2}} \quad [-] \quad (2.1)$$

mit: d_{50} , d_{20} , d_{10} (Korndurchmesser bei 50, 20 und 10 Gew.-%) in mm

Tabelle 2.1: Bewertungstabelle des Verfüllmaterials

Eignungszahl	0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 50	> 50
Bewertung	sehr gut	gut	ausreichend	schlecht	unbrauchbar

2.2.6 Reichweite und Ausführungsraster

Mit dem Abstand zum Rüttler nimmt die Verdichtungswirkung ab. Ausgehend von einer geforderten Mindestlagerungsdichte des Bodens, die nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten vorhanden sein soll, wird der Wirkungsradius des Rüttlers ermittelt. Unter dem Wirkungsradius versteht man den Abstand um den Rüttler innerhalb dessen die Mindestlagerungsdichte nicht unterschritten wird.

Durch die Anordnung der einzelnen Verdichtungspunkte lassen sich Flächen beliebigen Ausmaßes effizient verdichten. Typische Rasteranordnungen sind in Bild 2.7 dargestellt. Für Einzelfundamente werden häufig rechteckige oder quadratische Raster verwendet, wohingegen bei großflächigen Gründungen sich das Raster aus gleichseitigen Dreiecken zusammensetzt.

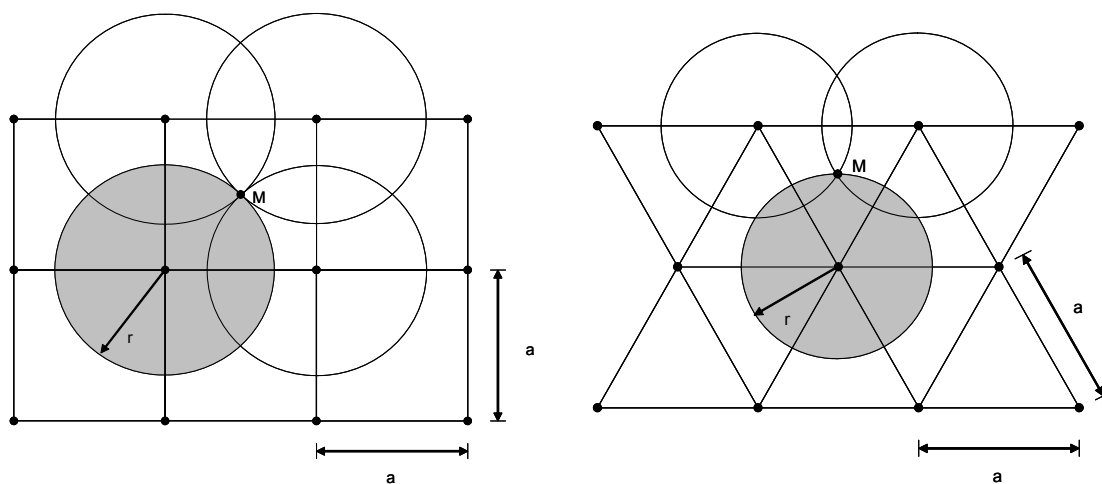


Bild 2.7: Verdichtungs raster und Wirkungsfläche für unterschiedliche Gründungsvarianten

Versuche von POTEUR (1971) und D'APPOLONIA (1953) haben gezeigt, dass die Dichteerhöhung im Mittelpunkt M eines jeweiligen Dreiecks bzw. Quadrates, mit der Summe aus den einzelnen Verdichtungerhöhungen im Abstand r jedes Verdichtungspunktes abgeschätzt werden kann. Der Abstand r beschreibt hierbei die Strecke vom Rüttel-

zentrum (Verdichtungspunkt) zum Mittelpunkt M der Rasterfigur und ergibt sich wie folgt:

$$\text{Dreieck: } r = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad , \quad \text{Quadrat: } r = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad . \quad (2.2)$$

Anhand einer Proberüttlung kann die Verdichtungswirkung eines Tiefenrüttlers in verschiedenen Entfernungen vom Rüttelzentrum ermittelt werden. Im nächsten Schritt wird die Dichteerhöhung in Bezug auf die Ausgangslagerungsdichte im Abstand r bestimmt und mit der Anzahl der umliegenden Rüttelpunkte (beim Dreieck 3, beim Quadrat 4) multipliziert.

Die Reichweite der von einem Punkt aus erfolgten Verdichtung hängt neben der Bodenart, der geforderten Lagerungsdichte und dem benutzten Gerätetyp von dessen Betriebsparametern wie z.B. Rüttlerfrequenz und Unwuchtmasse ab. Eine Übersicht über die empirischen Werte bezüglich der Verdichtungsreichweite wird in Bild 2.8 gegeben. In der Literatur liegen die Abschätzungen des Wirkungsradius zwischen 1,5 m und 3,0 m.

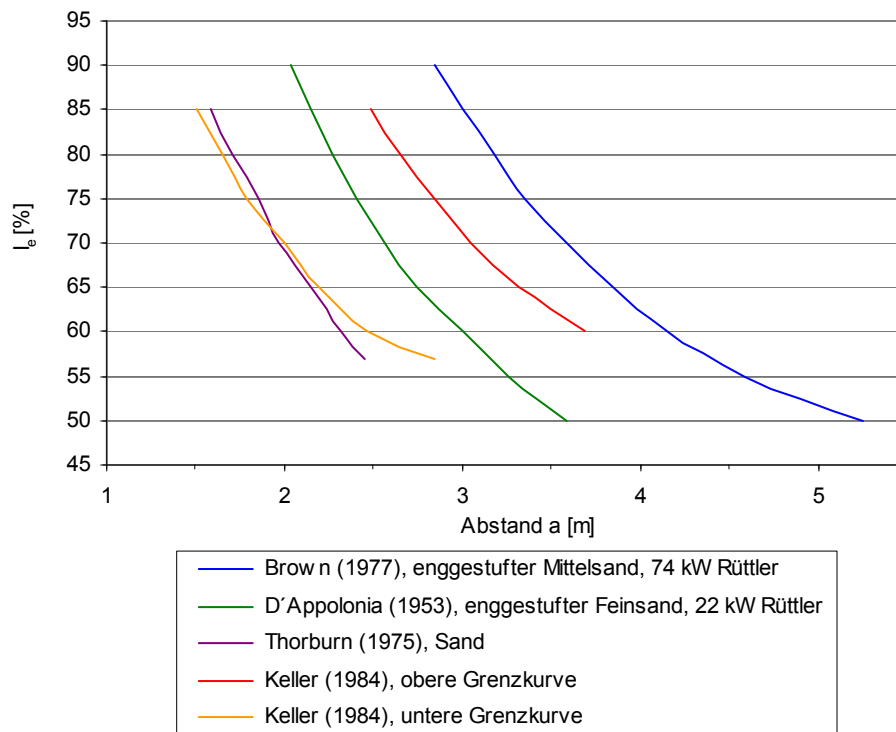


Bild 2.8: Relative Lagerungsdichte im Zentrum von dreieckigen Verdichtungsrastern in Abhängigkeit vom Rüttlerabstand in Anlehnung an FELLIN (2000)

Die großen Differenzen der in Bild 2.8 dokumentierten Wirkungsradien sind mit den unterschiedlichen Maschinen- und Bodenparameter der einzelnen Untersuchungen zu begründen. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist daher nicht gegeben. Die dargestellten Reichweiten sind deshalb als Orientierung anzusehen.

Die Auswertung der Literatur zur Verdichtungsreichweite und Konzeption des Ausführungsrasters macht wiederum deutlich, dass für die RDV aufgrund der komplexen Interaktionen zwischen Rüttler und Boden bisher kein allgemeingültiges Bemessungsverfahren entwickelt werden konnte (vgl. 2.2.3). Für Großprojekte werden aus diesem Grund zur Bestimmung der Verfahrensparameter vor Projektbeginn Verdichtungsversuche angestrebt.

Die durch den Rüttler in den Boden induzierte Fliehkraft F (auch als *Schlagkraft* bezeichnet), bestimmt maßgeblich die Verdichtungsleistung sowohl in Bezug auf die erzielbare Lagerungsdichte als auch die Verdichtungsreichweite. Die beeinflussbaren Maschinenparameter sind hierbei die Unwuchtmasse m_u , die mit dem Radius r um die Rüttlerachse rotiert, und die Rüttlerfrequenz Ω .

$$F = m_u \cdot r \cdot \Omega^2 \quad [\text{kN}] \quad (2.3)$$

In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass die in den Boden eingeleitete Fliehkraft maschinentechnisch auf sehr unterschiedliche Weise erzeugt werden kann. Bei gleicher Fliehkraft erzeugt die Verwendung einer kleinen Unwuchtmasse mit einer hohen Frequenz, im Vergleich zu einer großen Unwuchtmasse mit einer niedrigen Frequenz, ein unterschiedliches Verdichtungsergebnis.

Die Bandbreite der Verdichtungsreichweite ist anhand der Änderung der Lagerungsdichte mit zunehmendem Abstand zum Rüttler qualitativ in Bild 2.9 dargestellt. Die Kenntnis dieses Zusammenhangs von Ursache und Wirkung, stellt eine wichtige Basis dar, um die Betriebsparameter an die Randbedingungen der jeweiligen Verdichtungs-aufgabe anpassen zu können. Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass die größte Fliehkraft bzw. höchste Frequenz nicht grundsätzlich zum besten Verdichtungsergebnis führt. Im Hinblick auf die Verdichtungsreichweite sind in der Literatur uneinheitliche Angaben zu finden. FELLIN (2000) gibt an, dass die Reichweite umso größer wird, je niedriger die Frequenz und je größer die Kraft ist.

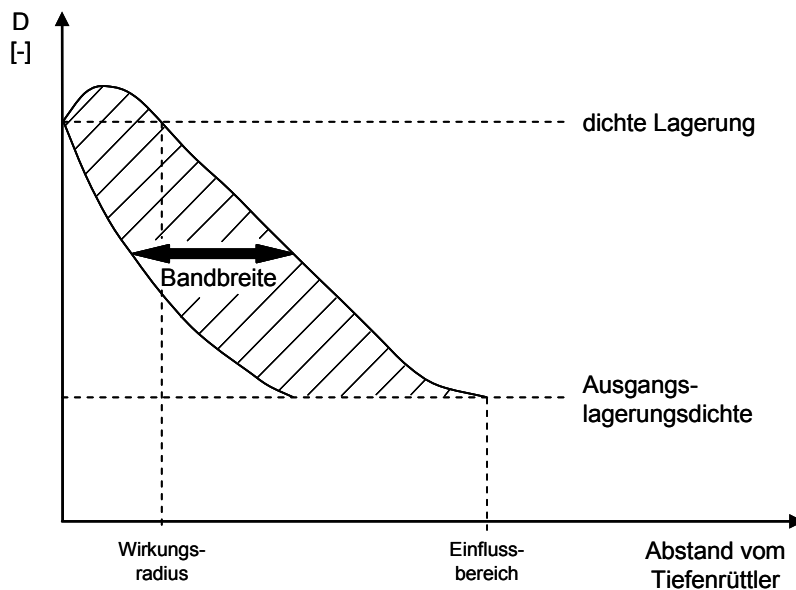


Bild 2.9: Bandbreite der Verdichtungsreichweite bei fliehkraftgleicher Einwirkung durch den Tiefenrüttler in Anlehnung an FELLIN (2000)

Die Literaturlauswertung zeigt, dass bisher keine wissenschaftlichen Untersuchungen zum Einfluss der Rüttlerfrequenz und der Unwuchtmasse auf die Verdichtungsreichweite unter reproduzierbaren Randbedingungen durchgeführt wurden. Erkenntnisse hieraus können als Grundlage für die Entwicklung von Bemessungsempfehlungen und einer aktiven Steuerungstechnik dienen.

2.2.7 Verdichtungskontrollen und Überwachung

Zur Erfassung der Lagerungsdichte in der jeweiligen Tiefe während des Verdichtungsvorganges stehen derzeit keine Verfahren zur Verfügung, die eine präzise direkte Messung der Dichte zulassen. Damit es dennoch möglich ist, qualitative Aussagen über den aktuellen Verdichtungsprozess zu machen, bedient man sich indirekter Verfahren.

Während des Verdichtungsvorganges werden in der Regel verschiedene Herstellungs- und Maschinenparameter aufgezeichnet und dokumentiert (FGSV, 1979):

- Maximum und zeitlicher Verlauf der Stromstärke bzw. des Öldrucks des Rüttlers
- Menge, Art und Qualität des Verfüllmaterials
- Herstellungszeit je Verdichtungspunkt
- Gesamtenergieverbrauch je Verdichtungspunkt

Die dokumentierten Daten dienen der Qualitätskontrolle für die Verdichtung. Allerdings kann es zu Widersprüchen zwischen den Ergebnissen, die aus den o.g. gemessenen Werten gefolgert werden, und den tatsächlichen Verdichtungsresultaten kommen. FELLIN (2000) zeigt, dass die Auswertung der Stromaufnahme oder des Öldruckes des Rüttlers keinen verlässlichen Aufschluss über den tatsächlichen Verdichtungszustand des Bodens liefert.

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte führt man nach Beendigung der Verdichtungsarbeiten Ramm- oder Drucksondierungen durch. Aus Bild 2.7 geht hervor, dass die Messpunkte in der Regel dort positioniert werden, wo sie am weitesten von den benachbarten Rüttelpunkten entfernt sind, d.h. im Zentrum der Dreiecke bzw. Quadrate des Verdichtungsrasters. Bei der Sondierung ist weiterhin zu beachten, dass der Eindringwiderstand kurz nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten erheblich kleiner sein kann als der Widerstand an derselben Stelle einige Zeit später. Unterschiede von bis zu 100 % konnten dabei festgestellt werden. Diese Tatsache führen KIRSCH, SONDERMANN (2001) darauf zurück, dass der Boden einem Alterungseffekt (*soil aging*) unterliegt, der mehrere Wochen dauern kann und bei dem die Bodenfestigkeit infolge des Porenwasserdruckabbaues sowie durch das Wiederherstellen von physikalischen und chemischen Bindungskräften im Boden nur langsam zunimmt. SCHMERTMANN (1987) und BAXTER (1999) führen die zeitabhängige Zunahme des Sondierwiderstandes vor allem auf mechanische Effekte zurück. Als mögliche Ursachen sind die „Kornverhakung“ (*micro-locking*), Spannungsumlagerungen und -konzentrationen zu nennen. Der Effekt des *soil aging* von Sanden ist auch im Zusammenhang mit der zeitabhängigen Zunahme der Tragfähigkeit von Rammpfählen bekannt.

Eine Online-Kontrolle der Verdichtung mittels der gemessenen Rüttlerbewegung hat FELLIN (2002) erprobt. Hierbei wurden mit Beschleunigungsmessungen in zwei Ebenen und der Bestimmung der Lage der Unwucht die Feder- und Dämpfersteifigkeiten für ein Ersatzmodell errechnet. Er stellte fest, dass sich ein Abbruchkriterium zum Zeitpunkt der maximalen Verdichtung an diesen mechanischen Größen des Ersatzsystems orientieren kann. Auf das mechanische Modell in Analogie zur Fundamentalschwingung, welches für das System Rüttler-Boden angenommen wurde, wird an späterer Stelle dieser Arbeit in Kapitel 2.3.2 eingegangen.

2.3 Analytische Modelle zur Beschreibung der Rütteldruckverdichtung

2.3.1 Grundlagen und Terminologie

Die Bodendynamik befasst sich im Gegensatz zur klassischen Bodenmechanik mit der zeitabhängigen Beanspruchung des Untergrundes. Insbesondere werden der Einfluss von Trägheitskräften und Schwingungsausbreitungen im Boden sowie die Abbildung zeitabhängiger Belastungsverläufe berücksichtigt. Im Allgemeinen sind die dynamischen Bodeneigenschaften nichtlinear, jedoch können sie bei sehr kleinen Verformungen des Bodens inkrementell linearisiert werden (KLEIN, 2001), so dass ein lineares visko-elastisches Materialverhalten angenommen werden kann. Durch die Wahl sinnvoller Systemmodelle wird es möglich, das Verhalten des Bodens bei dynamischer Beanspruchung einem analytischen Berechnungsansatz zugänglich zu machen. In dem folgenden Kapitel werden die wichtigen Grundlagen für das Verständnis der bodendynamischen Mechanismen zusammengefasst.

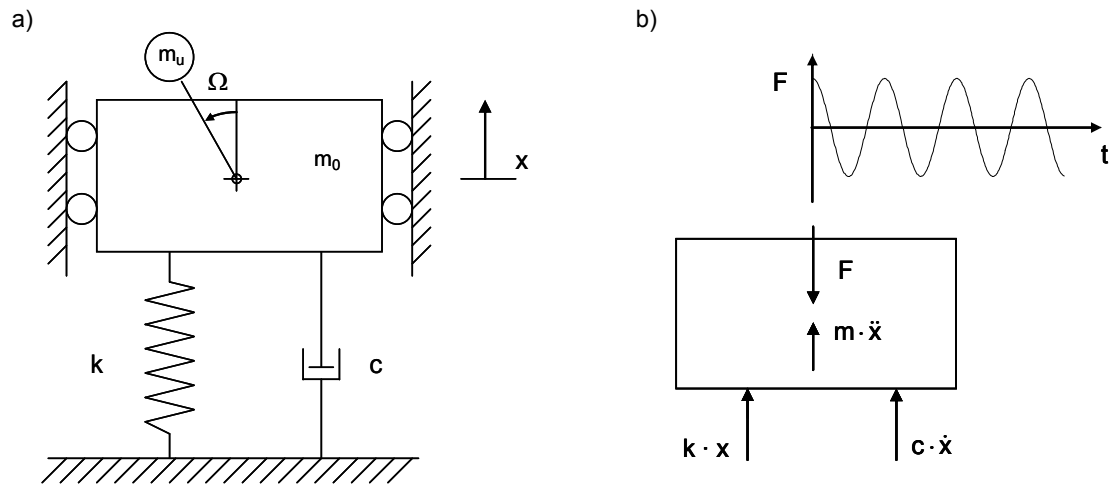
2.3.1.1 Ersatzsysteme

Dynamische Bodenverdichter erzeugen Schwingungen durch exzentrisch rotierende Massen. Die Fliehkraft wächst quadratisch mit der Frequenz. Das Zusammenwirken des Schwingungserregers mit dem anstehenden Boden, lässt sich durch das dynamische Ersatzsystem einer gedämpften erzwungenen Schwingung abbilden. Die Grundschwingung des Ersatzsystems hat in der Regel harmonische und periodische Merkmale. Es handelt sich um eine quadratische Anregung der Form:

$$F = m_u \cdot r \cdot \Omega^2 \cdot \cos \Omega t \quad . \quad (2.4)$$

Es gilt:

- m_u : Unwuchtmasse
- r : Radius
- Ω : Erregerfrequenz



Es gilt: m_0 : Masse
 m_u : Unwuchtmasse

k : Federsteifigkeit
 c : Dämpfungskoeffizient

Bild 2.10: Masse-Feder System mit quadratischer Anregung in Anlehnung an HAUGER (1986)

- a) Massenschwinger
 b) Masse mit angreifenden Kräften

Zur Ermittlung der Bewegungsgleichung wird die Impulsbilanz aufgestellt. Das geschieht formal nach dem Prinzip von d'Alembert am freigeschnittenen System (Bild 2.10, b), in dem die Trägheitskraft negativ in die Gleichgewichtsbedingung eingeführt wird. Die Bewegungsgleichung lautet:

$$F_{(t)} = (m_0 + m_u) \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = m_u \cdot r \cdot \Omega^2 \cdot \cos \Omega t . \quad (2.5)$$

Mit den Abkürzungen

$$2\delta = \frac{c}{m}, \quad \omega^2 = \frac{k}{m}, \quad \eta = \frac{\Omega}{\omega}, \quad (2.6)$$

und

$$m = m_0 + m_u, \quad x_0 = \frac{m_u}{m} \cdot r, \quad (2.7)$$

erhält man die Bewegungsgleichung zu

$$\ddot{x} + 2\delta \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = \omega^2 \cdot \eta^2 \cdot x_0 \cdot \cos \Omega t . \quad (2.8)$$

Eine Umformung mit Hilfe des Lehrschen Dämpfungsmaßes $D = \delta / \omega$ ergibt für die Erregung mit einer rotierenden Unwucht die Bewegungs-DGL

$$\frac{1}{\omega^2} \cdot \ddot{x} + \frac{2D}{\omega} \cdot \dot{x} + x = x_0 \cdot \eta^2 \cdot \cos \Omega t. \quad (2.9)$$

Die hier maßgebende Partikularlösung dieser DGL ergibt sich unter Berücksichtigung einer Phasenverschiebung φ zwischen Erregung und Ausschlag wie folgt:

$$x(t) = x_p = x_0 \cdot V \cdot \cos(\Omega t - \varphi). \quad (2.10)$$

2.3.1.2 Dämpfung

Bei dynamisch beanspruchten Systemen treten Energieverluste auf, die unter dem Begriff Dämpfung zusammengefasst werden. Man unterscheidet dabei in der Bodendynamik zwischen der Materialdämpfung und der geometrischen Dämpfung, auch Abstrahlungsdämpfung genannt, wobei die Materialdämpfung gegenüber der geometrischen Dämpfung in den meisten Fällen deutlich kleiner ist.

2.3.1.2.1 Materialdämpfung

Ein Teil der im System vorhandenen kinematischen Energie wird aufgrund von irreversiblen Verformungen und Reibung zwischen den einzelnen Bodenkörnern in Wärmeenergie umgewandelt. Diese durch die Materialdämpfung verursachte Energieumwandlung nennt man Dissipation. Dieser Zusammenhang kann für das Gebiet der Bodendynamik anschaulich durch die Spannungs-Dehnungs-Hysteresese am Beispiel eines zyklischen Triaxialversuchs dargestellt werden. Die von der Ellipse eingeschlossene Fläche in Bild 2.11 entspricht dabei der pro Belastungszyklus dissipierten Energie ΔW infolge der Dämpfung des Materials.

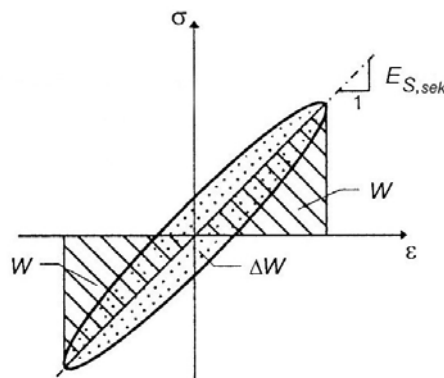


Bild 2.11: Hystereseschleife am Beispiel eines zyklischen Triaxialversuchs (GOTSCHOL, 2002)

Das Verhältnis der dissipierten Energie ΔW zur elastischen Gesamtenergie W des Systems pro Zyklus wird als Dämpfungskapazität ψ bezeichnet (DGGT, 2002).

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} \quad (2.11)$$

Das Dämpfungsverhältnis D ist das gebräuchlichste Dämpfungsmaß. Es gibt die Relation zwischen vorhandener Dämpfung c und kritischer Dämpfung c_c eines Masse-Feder-Dämpfer-Systems an ($D = 0$: ungedämpft, $D = 1$: aperiodisch gedämpft). Die kritische Dämpfung stellt dabei den kleinsten Wert des viskosen Dämpfungskoeffizienten dar, für den das System gerade noch aperiodisches Verhalten zeigt (FELLIN, 2000).

$$D = \frac{c}{c_c} \quad [-] \quad (2.12)$$

Es gilt:

$$c_c = 2 \sqrt{k \cdot m}$$

k : Federsteifigkeit [kN/m]
 m : Masse [kg]

Für den Resonanzfall kann nach DGGT (2002) folgende Annahme getroffen werden:

$$D = \frac{\psi}{4\pi} \quad [-]. \quad (2.13)$$

Durch den Verlustfaktor η_v wird, ähnlich wie die Dämpfungskapazität ψ , das Verhältnis der dissipierten Energie pro Periodenteil einer Schwingung ($\Delta W/2\pi$) zur elastischen Gesamtenergie W wiedergegeben (SUN et al., 1995).

$$\eta_v = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot W} \quad [-] \quad (2.14)$$

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Materialdämpfung in der Nähe der Emissionsquelle am größten ist, da dort die größten Dehnungen auftreten (FLESCH, 1986). Bindige Böden besitzen in der Regel größere Dämpfungseigenschaften als nichtbindige Böden (STUDER, ZIEGLER, 1986).

2.3.1.2.2 Geometrische Dämpfung

Ausgehend von einer Emissionsquelle werden Schwingungen in den Untergrund induziert, die sich zylindrisch oder kugelförmig in Form von Wellen im Halbraum ausbreiten. Mit wachsender Entfernung von der Erregerquelle bestreicht die Wellenfront eine im-

mer größere Fläche, auf die sich die Gesamtenergie verteilt. Dieser Effekt wird geometrische Dämpfung oder auch Abstrahlungsdämpfung genannt. Die geometrische Dämpfung hängt vornehmlich von der Art der Erregerquelle sowie von den durch die Quelle generierten Wellenarten und deren Entfernung vom Emissionsort ab.

Als Folge des Energieverlustes kommt es zu einer zeitlichen Abnahme der Schwingungsamplitude. Je größer der Dämpfungsgrad D des Systems ist, desto stärker nimmt die Amplitude der Schwingung ab. Hierbei können drei Dämpfungsfälle unterschieden werden: die unterkritische, die kritische und die überkritische Dämpfung.

Nach Gleichung 2.12 stellt der Dämpfungsgrad D das Verhältnis der vorhandenen Dämpfung c zu der kritischen Dämpfung c_c des Systems dar. Die kritische Dämpfung stellt dabei den kleinsten Wert des Dämpfungskoeffizienten dar, für den das System gerade noch aperiodisches Verhalten zeigt (aperiodischer Grenzfall: $D = 100\%$, Bild 2.12 c). Tritt eine Systemdämpfung auf ($D > 0\%$) und liegt diese unterhalb der kritischen Dämpfung c_c ($D < 100\%$), so ist das System unterkritisch gedämpft (Bild 2.12 b). Es stellt sich eine mit der Zeit exponentiell abklingende Schwingung ein, die ohne eine äußere Einwirkung zum Stillstand kommt (STUDER, KOLLER, 1997). Als überkritisch gedämpft bezeichnet man Systeme, die ohne Schwingungen aperiodisch in ihre Ausgangslage zurückkehren (Bild 2.12 d).

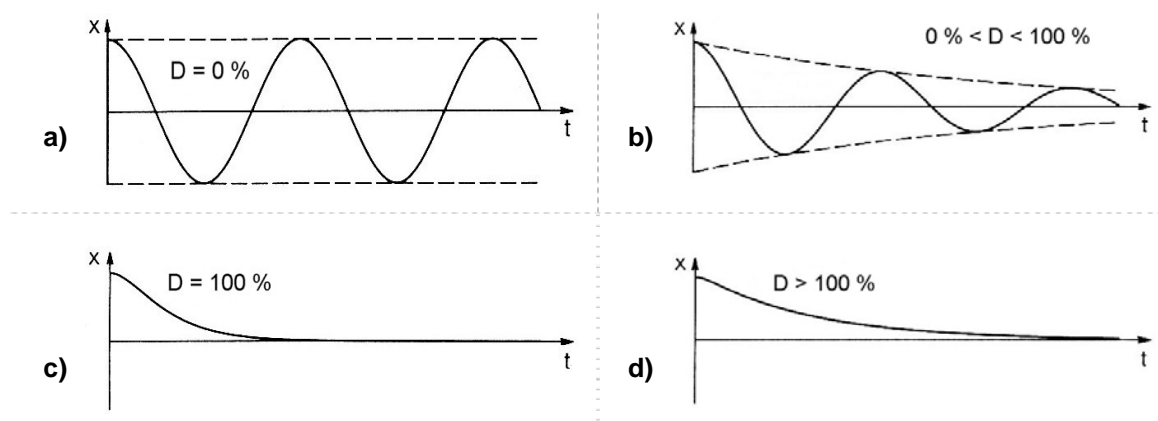


Bild 2.12: Bewegungsverläufe bei unterschiedlichen Dämpfungen aus STUDER, KOLLER (1997):
a) ungedämpft, b) unterkritisch gedämpft, c) kritisch gedämpft,
d) überkritisch gedämpft

2.3.1.3 Übertragungsfunktion

Wird ein System durch eine periodische Kraft mit der Kreisfrequenz Ω erregt, so wirkt sich die Erregerfrequenz auf die erzwungene Bewegung des Systems aus. In Abhängigkeit von der Dämpfung erfolgt auf die Erregung eine um den Phasenwinkel φ verschobene Reaktion des Systems (Systemantwort). Die Größe der Amplitude wird dabei von dem Frequenzverhältnis η beeinflusst. Dieses setzt die Erregerfrequenz Ω ins Verhältnis zu der Eigenfrequenz ω_0 des erregten Systems:

$$\eta = \frac{\Omega}{\omega_0} \quad [-] . \quad (2.15)$$

In Bild 2.13 sind die Vergrößerungsfunktion $V(\eta)$ sowie die Phasenverschiebung φ in Abhängigkeit vom Frequenzverhältnis η für unterschiedliche Dämpfungsgrade D dargestellt.

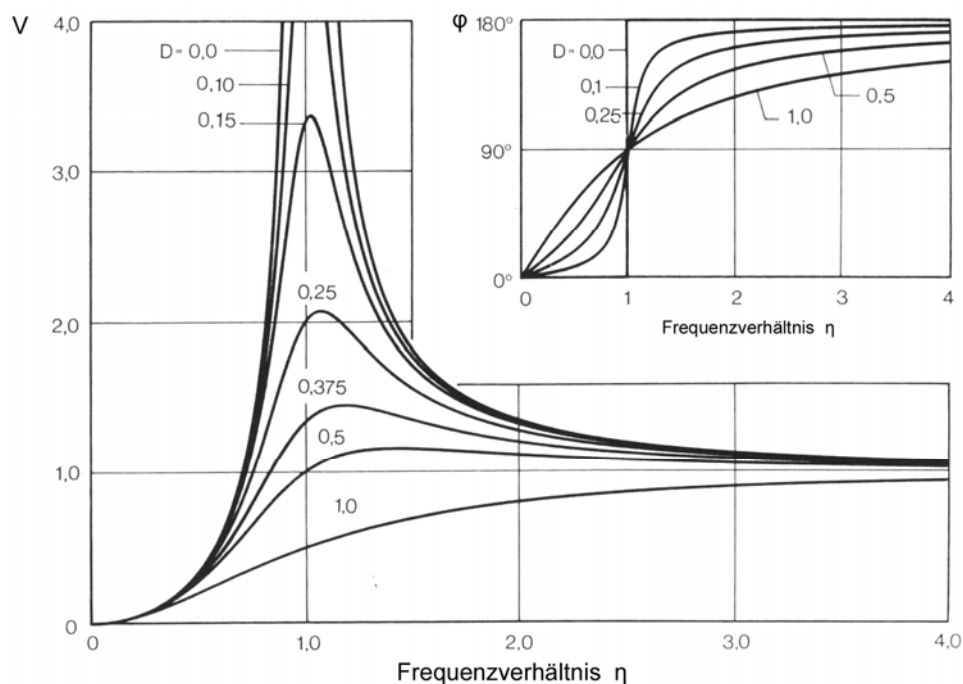


Bild 2.13: Resonanzkurven und Phasenverschiebung bei quadratischer Anregung aus STUDER, KOLLER (1997)

Für schwach gedämpfte Systeme tritt bei einem Frequenzverhältnis von $\eta \approx 1$, also bei einer Erregerfrequenz Ω in der Nähe der Systemeigenfrequenz ω_0 , die maximale Verstärkung der Amplituden auf. Dieser als Resonanz bezeichnete Effekt ist mit steigender

Dämpfung immer weniger von der Erregerfrequenz abhängig, da sich gleichzeitig der Resonanzbereich mit abnehmender Amplitude verbreitert. Mit wachsender Dämpfung bleibt die Erregerfrequenz Ω zwar unverändert, allerdings verringert sich die Eigenfrequenz des Systems (siehe Gleichung 2.16).

$$\omega_d = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - D^2} \quad [1/s] \quad (2.16)$$

Damit verbunden ist eine Zunahme des für die Resonanz notwendigen Frequenzverhältnisses $\eta = \Omega/\omega_0$ mit zunehmender Dämpfung, da für die quadratische Erregung gilt:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \cdot D^2}} \quad [-] \quad (2.17)$$

Ist die Vermeidung von Resonanzeffekten bei gering gedämpften Systemen gewünscht, so ist ein Frequenzverhältnis von $\eta \geq \sqrt{2} \approx 1,4$ anzustreben, dass heißt, die Erregung muss mit einer höheren Frequenz als der Eigenfrequenz erfolgen. Dadurch kommt es zu einer Verkleinerung der Amplituden. Dieser Effekt der Amplitudenreduktion kann bei der Schwingungsisolierung von Maschinen oder Gebäuden genutzt werden. Der Vergrößerungsfaktor V (auch Übertragungsfunktion genannt) einer Amplitude ist für eine quadratische Erregung wie folgt definiert:

$$V = \frac{\eta^2}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot \eta^2}} \quad [-] \quad (2.18)$$

Es gilt: $\eta = \Omega/\omega_0$ Frequenzverhältnis
 $D = c/c_c$ Dämpfungsgrad

Der Phasenwinkel φ gibt an, um wie viel die Verschiebung der erregenden Kraft nacheilt.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{2 \cdot D \cdot \eta}{1 - \eta^2}\right) \quad [^\circ] \quad \text{für: } 0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ \quad (2.19)$$

In Tabelle 2.2 sind einige charakteristische Werte der Vergrößerungsfunktion zusammengestellt.

Tabelle 2.2: Charakteristische Werte der Vergrößerungsfunktion aus STUDER, KOLLER (1997)

Frequenzverhältnis η	Vergrößerungsfaktor V	Phasenwinkel φ
0	0	0
1	$\frac{1}{2 \cdot D}$	$0,5 \cdot \pi$ bzw. 90°
∞	1	π bzw. 180°

2.3.1.4 Wellenausbreitung im Boden

Als mechanische Schwingung wird die zeitabhängige Bewegung von Teilchen um ihre Ruhelage infolge einer Änderung des Deformations- bzw. Spannungszustandes bezeichnet. Aufgrund der elastischen Kopplung werden auch benachbarte Teilchen in Bewegung versetzt, wobei es zu einer Energieübertragung kommt. Es entsteht eine elastomechanische Welle, die sich je nach Art des Ausbreitungsmediums mit einer spezifischen Wellengeschwindigkeit c ausbreitet.

Die Kompressions- und Scherwellen breiten sich um die Erregerquelle kugelförmig aus, weshalb sie auch als Raumwellen bezeichnet werden. Erreichen die Raumwellen den freien Rand der Halbraumoberfläche, hat die Einhaltung der Randbedingungen einer spannungsfreien Oberfläche die Bildung eines neuen Wellentyps zur Folge, der so genannten Rayleigh-Wellen. Diese Wellenart breitet sich zylindrisch entlang der Oberfläche des Halbraumes aus und zählt somit zu den Oberflächenwellen.

Für die Beschreibung der Mechanismen der dynamischen Tiefenverdichtung ist die Betrachtung der Kompressions- und Scherwellen maßgebend. Im Folgenden werden deshalb die Grundlagen dieser Wellentypen zusammengefasst. Eine Beschreibung der Oberflächenwellen kann z.B. HAUPT (1986) oder STUDER, KOLLER (1997) entnommen werden.

2.3.1.4.1 Kompressionswellen

Die Kompressionswellen (auch Longitudinal- oder Druckwellen genannt) werden im Allgemeinen als Primärwellen (P-Welle) bezeichnet, da dieser Wellentyp die höchste Ausbreitungsgeschwindigkeit besitzt und somit zuerst registriert wird (STURER, ZIEGLER, 1986). Die Bodenpartikel bewegen sich dabei parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle und werden an den Wellenfronten komprimiert.

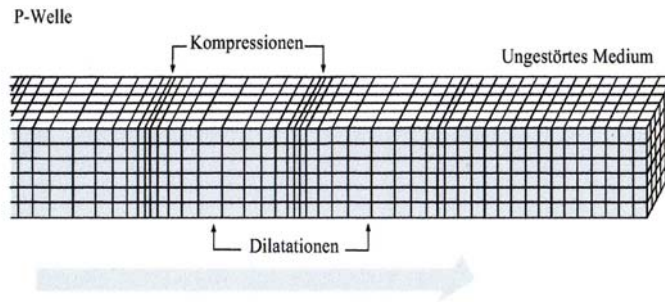


Bild 2.14: Ausbreitung von Kompressionswellen aus BOLT (1984)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_P , mit der sich die P-Welle fortbewegt, ergibt sich, wie durch TUNG (2002) und HAUPT (1986) beschrieben, aus der Wellengleichung und lässt sich in Abhängigkeit von unterschiedlichen Größen ermitteln:

$$c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{E_{s,d}}{\rho}} \quad [\text{m/s}] . \quad (2.20)$$

Es gilt:

- G_d : Dynamischer Schubmodul
- $E_{s,d}$: Dynamischer Steifemodul
- ρ : Feuchtdichte
- ν : Querdehnzahl
- λ, μ : Lamé'sche Konstanten

2.3.1.4.2 Scherwellen

Durch die Kompressionswelle werden in radialer Richtung aufeinander folgende Bereichen der Kompression und Dilatation erzeugt (Bild 2.14). Hierdurch kommt es zu Tangentialspannungen, die wiederum Transversalwellen generieren. Diese Wellenart wird als Scher- oder Sekundärwelle (S-Welle) bezeichnet.

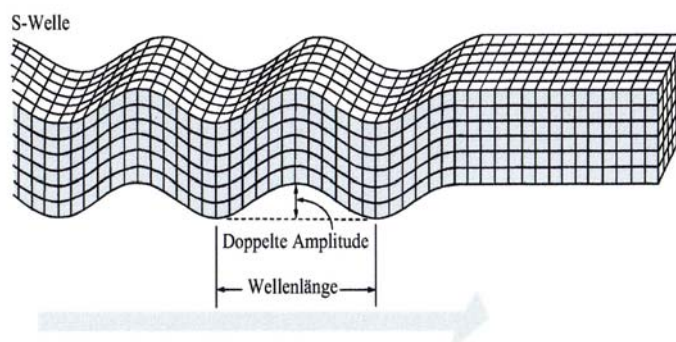


Bild 2.15: Ausbreitung von Scherwellen aus BOLT (1984)

Die Partikelbewegungen bei S-Wellen erfolgen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit c_s ergibt sich zu:

$$c_s = \sqrt{\frac{G_d}{\rho}} \quad [\text{m/s}] . \quad (2.21)$$

Das Verhältnis der beiden Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten c_p und c_s ergibt sich nach TUNG (2002) zu:

$$\frac{c_p}{c_s} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}} \quad [-] . \quad (2.22)$$

Die Querdehnzahl ν kann Werte im Bereich von $0 \leq \nu < 0,5$ annehmen. Daher folgt aus Gleichung (2.22), dass P-Wellen stets eine höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit als S-Wellen besitzen ($c_p > c_s$). Generell gilt, dass mit zunehmender Dichte des Bodens die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwingungen ansteigt (MILITZER et al., 1987). Dies ist auf eine Reduktion des Porenraumes sowie einen überlinearen Anstieg des Elastizitäts- und Schubmoduls mit anwachsender Dichte zurückzuführen.

Es bleibt festzuhalten, dass die rein rechnerische Bestimmung der Wellengeschwindigkeiten mit deutlichen Unsicherheiten behaftet ist. Dies ist damit zu begründen, dass die erforderlichen Eingangsparameter aus der Literatur mit erheblichen Schwankungsbreiten angegeben werden. Eine genauere Bestimmung der Wellengeschwindigkeiten kann nur auf der Grundlage von Labor- oder Feldversuche durchgeführt werden.

2.3.2 Analytische Modellansätze

Die Rüttlerbewegung ist von den Eigenschaften des umgebenden Bodens abhängig. Der anstehende Boden schränkt die Bewegungen des Rüttlers aufgrund seiner vorhandenen Steifigkeit ein. In der Bodendynamik wird das Verhalten des Bodens unter dynamischer Einwirkung häufig durch ein Feder-Dämpfer-System idealisiert. Die Steifigkeit des Bodens wird dabei durch die Federsteifigkeit k beschrieben und der Dämpfungskoeffizient c entspricht der Summe aus Abstrahlungs- und Materialdämpfung.

Für die Beschreibung der Modelle der dynamischen Oberflächenverdichtung werden in der Regel die Zusammenhänge anhand einfacher eindimensionaler Ersatzsysteme

abgebildet (vgl. 2.3.1.1). Da es sich bei der Abbildung der Rütteldruckverdichtung um eine mehrdimensionale Aufgabenstellung handelt, ist zu bewerten, ob derartige Systeme den hier gestellten Anforderungen gerecht werden. Zur Beschreibung der Bewegung eines Tiefenrüttlers im Boden sind in der Literatur lediglich durch FELLIN (2000) zwei analytische Modellansätze in Analogie zu einer Fundamentalschwingung und einer Pfahlschwingung vorgestellt worden. Es folgt eine Zusammenfassung der Herleitung dieser Modelle, als erforderliche Grundlage für die Verifikation der analytischen Berechnungsansätze in Kapitel 4.

2.3.2.1 Fundamentmodell

In Analogie zu der Bewegung eines Tiefenrüttlers hat FELLIN (2000) die erzwungene Schwingung eines ebenen Pendels und eines rotierenden räumlichen Pendels untersucht. Es wird hierbei der Gleichgewichtszustand der Pendelbewegung betrachtet, mit einer konstanten Amplitude der Bewegung und einer konstanten Winkelgeschwindigkeit. Zudem wird die Annahme einer konstanten Massenverteilung über die Länge des Pendels getroffen. Unter diesen Voraussetzungen wird in FELLIN (2000) nachgewiesen, dass ein linearisiertes ebenes Pendel der Projektion der Bewegung eines rotierenden Pendels in einer vertikalen Ebene entspricht. Die o.g. Voraussetzungen sind auf einen mit einer konstanten Bewegungsamplitude schwingenden Tiefenrüttler übertragbar. Wird die Bewegung eines Tiefenrüttlers durch ein solches ebenes Ersatzsystem abgebildet, kann der hieraus resultierende Fehler als gering bewertet werden.

Beim Fundamentmodell wird der Rüttler als ebenes, im Boden schwingendes Pendel betrachtet und in einer Projektionsebene dargestellt. Es wird angenommen, dass der Rüttler keinen umseitigen Kontakt zum Boden hat, sondern immer nur einseitig in Wirkungsrichtung der Fliehkraft an die Lochwand gepresst wird und dort den Boden verdichtet. Gleichzeitig löst sich auf der gegenüber liegenden Seite der Rüttler von der Lochwand, wodurch es zur Auflockerung des Bodens kommt (Bild 2.16). Eine Hälfte des Rüttlers steht somit in permanentem Kontakt mit dem umliegenden Boden. Auf der gegenüberliegenden Hälfte bildet sich ein Spalt zwischen Rüttler und Lochwand, in den das Verfüllmaterial nachfließen kann. Vergleichbar mit einem Fundament auf dem elastischen Halbraum hat der Rüttler immer nur einseitigen Kontakt mit dem umgebenden Boden.

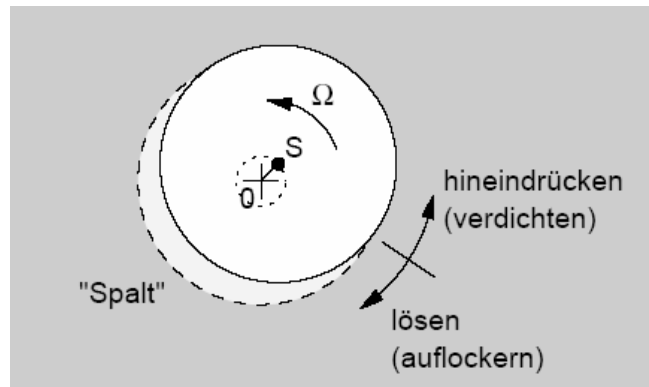


Bild 2.16: Auflockerungs- und Verdichtungszone um den Rüttler aus FELLIN (2000)

Damit die Horizontalschwingungen des Rüttlers den Vertikalschwingungen eines erregten Fundamentes entsprechen, wird das System um 90° gedreht. Die hierbei geänderte Wirkungsrichtung der Gravitation geht nach WOLF (1994) nicht in die Ableitung der Federsteifigkeit und der Dämpfungskoeffizienten ein, da die Wellenausbreitung unabhängig davon ist, ob ein horizontal oder vertikal begrenzter Halbraum betrachtet wird.

Die Bewegung des Rüttlers im Boden setzt sich aus einer Verschiebung x_S des Schwerpunktes S und einer Drehung ϑ um den Schwerpunkt zusammen. Das mechanische Ersatzmodell ist in Bild 2.17 dargestellt.

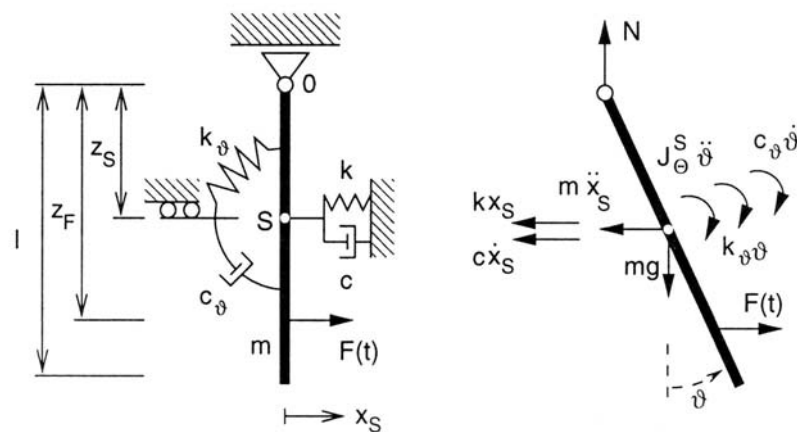


Bild 2.17: Gedämpftes Pendel in Analogie zur Fundamentalschwingung aus FELLIN (2000)

Für das Ersatzsystem gelten für die Kräfte in horizontaler Richtung und die wirkenden Momente folgende Gleichgewichtsbedingungen:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F \cdot \cos \Omega \cdot t, \quad (2.23)$$

$$J_{\Theta}^S \cdot \ddot{\vartheta} + c_{\vartheta} \cdot \dot{\vartheta} + (k_{\vartheta} + m \cdot g \cdot z_S) \cdot \vartheta = (z_F - z_S) \cdot F \cdot \cos \Omega \cdot t . \quad (2.24)$$

In (2.23) stellen k und c die Ersatzgrößen für die vertikale Fundamentschwingung dar, k_{ϑ} und c_{ϑ} in (2.24) die entsprechenden Größen für die Kippschwingung eines Fundamentes. Daraus ergeben sich die Eigenfrequenzen der beiden entkoppelten Schwingungen für die Verschiebung des Schwerpunktes und die Verdrehung zu:

$$\omega_x = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{und} \quad \omega_{\vartheta} = \sqrt{\frac{k_{\vartheta}}{J_{\Theta}^S}} . \quad (2.25)$$

Aus den Bewegungsgleichungen der zwei Schwingungen ergeben sich die Funktionen für die Bewegung des Schwerpunktes x_s sowie die Verdrehung ϑ :

$$x_s = X_s \cdot \sin(\Omega \cdot t + \alpha_s) \quad (2.26)$$

mit
$$X_s = \frac{F}{\sqrt{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2}} , \quad (2.27)$$

$$\alpha_s = \arctan\left(\frac{k - m \cdot \Omega^2}{c \cdot \Omega}\right) \quad \text{mit} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \alpha_s \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.28)$$

und

$$\vartheta = \Theta \cdot \sin(\Omega \cdot t + \alpha_{\vartheta}) \quad (2.29)$$

mit
$$\Theta = \frac{(z_F - z_S) \cdot F}{\sqrt{(k_{\vartheta} + m \cdot g \cdot z_S - J_{\Theta}^S \cdot \Omega^2)^2 + c_{\vartheta}^2 \cdot \Omega^2}} , \quad (2.30)$$

$$\alpha_{\vartheta} = \arctan\left(\frac{k_{\vartheta} + m \cdot g \cdot z_S - J_{\Theta}^S \cdot \Omega^2}{c_{\vartheta} \cdot \Omega}\right) \quad \text{mit} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \alpha_{\vartheta} \leq \frac{\pi}{2} . \quad (2.31)$$

Die Bewegung der Rüttlerspitze setzt sich aus diesen beiden Lösungen zusammen.

$$\begin{aligned} x &= x_s + (\ell - z_S) \cdot \vartheta = X_s \cdot \sin(\Omega t + \alpha_s) + \underbrace{(\ell - z_S) \cdot \Theta}_{x_{\Theta}} \cdot \sin(\Omega t + \alpha_{\vartheta}) \\ &= A \cdot \sin(\Omega t + \alpha) \end{aligned} \quad (2.32)$$

mit
$$A = \sqrt{X_S^2 + X_\Theta^2 + 2 \cdot X_S \cdot X_\Theta \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_\Theta)}$$
 (2.33)

$$\alpha = \frac{X_S \cdot \sin \alpha_S + X_\Theta \cdot \sin \alpha_\Theta}{X_S \cdot \cos \alpha_S + X_\Theta \cdot \cos \alpha_\Theta} . \quad (2.34)$$

Durch die Annahme, dass bei üblichen Rüttlern der Phasenwinkel der Verschiebung und der Verdrehung gleich ist ($\alpha_S \approx \alpha_\Theta$), kann die Amplitude der Spitze vereinfacht wie folgt bestimmt werden:

$$A \approx X_S + (\ell - z_S) \cdot \Theta , \quad (2.35)$$

$$\alpha \approx \frac{\alpha_S + \alpha_\Theta}{2} . \quad (2.36)$$

Eine weitere Vereinfachung ist nicht möglich, da die Federsteifigkeiten k und k_Θ sowie die Dämpfungskonstanten c und c_Θ unabhängig voneinander sind. Bei Verwendung dieses Modells ist es notwendig, die Bewegung des Rüttlers nicht nur an der Spitze zu erfassen, sondern auch in ausreichendem Abstand darüber. Nur so können die zwei Schwingungen des Systems bestimmt werden und entsprechend Rückschlüsse auf die Federsteifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten des umgebenden Bodens gezogen werden.

2.3.2.2 Pfahlmodell

In der Modellbildung für horizontale Pfahlschwingungen wird der Boden in Form von horizontalen Bodenscheiben mit jeweils einer Feder und einem Dämpfer dargestellt, welche voneinander unabhängig sind. In der Literatur (MAKRIS, GAZETAS, 1993) finden sich entsprechende Werte für die Federsteifigkeit k_x und die Dämpfung c_x . FELLIN (2000) überträgt das Prinzip der horizontalen Bodenscheiben auf die Modellbildung für den Rüttler im Boden und kommt so zum in Bild 2.18 dargestellten Ersatzsystem. Der Rüttler wird darin als starr angenommen, da er im Vergleich zum Boden eine sehr viel höhere Steifigkeit aufweist.

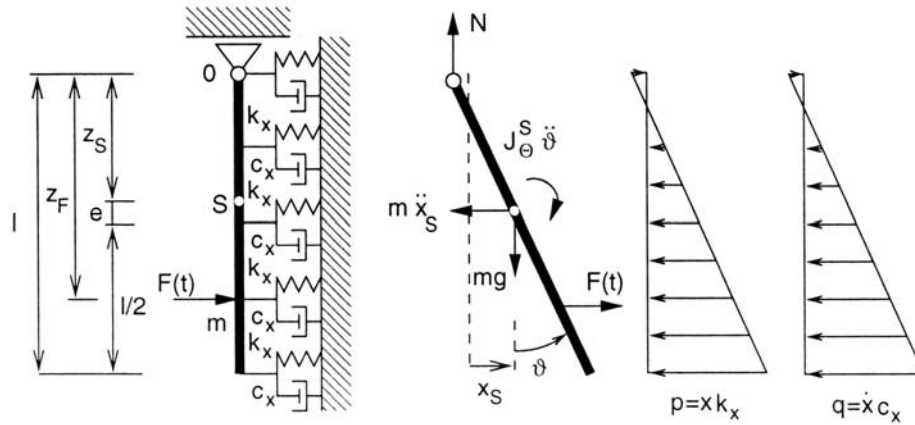


Bild 2.18: Gedämpftes Pendel in Analogie zur Pfahlschwingung aus FELLIN (2000)

Die elastische und die viskose Bodenreaktion infolge der Rüttlerbewegung können in der Form von Linienlasten idealisiert werden. Die Resultierenden lauten:

$$P = k_x \cdot (x_S \cdot \ell + \vartheta \cdot \ell \cdot e) , \quad (2.37)$$

$$Q = c_x \cdot (\dot{x}_S \cdot \ell + \dot{\vartheta} \cdot \ell \cdot e) , \quad (2.38)$$

$$M_P = k_x \cdot \left(x_S \cdot \ell \cdot e + \vartheta \cdot \ell \cdot \left(\frac{\ell^2}{12} + e^2 \right) \right) , \quad (2.39)$$

$$M_Q = c_x \cdot \left(\dot{x}_S \cdot \ell \cdot e + \dot{\vartheta} \cdot \ell \cdot \left(\frac{\ell^2}{12} + e^2 \right) \right) . \quad (2.40)$$

Das Kräftegleichgewicht in horizontaler Richtung und das Momentengleichgewicht um den Schwerpunkt lauten

$$m \cdot \ddot{x}_S + P + Q = F \cdot \cos \Omega t , \quad (2.41)$$

$$J_{\Theta}^S \cdot \ddot{\vartheta} + m \cdot g \cdot z_S \cdot \vartheta + M_P + M_Q = (z_F - z_S) \cdot F \cdot \cos \Omega t . \quad (2.42)$$

Diese gekoppelten Differentialgleichungen lassen sich nur analytisch lösen, wenn die Ausmittigkeit des Schwerpunkts vernachlässigt wird ($e \approx 0$). Die Gleichungen werden durch diese Näherung entkoppelt und entsprechen den Gleichungen aus der Analogie zur Fundamentalschwingung mit den Federsteifigkeiten und Dämpfungskoeffizienten

$$k = \ell \cdot k_x, \quad c = \ell \cdot c_x, \quad k_g = \ell \cdot k_x \cdot \frac{\ell^2}{12}, \quad c_g = \ell \cdot c_x \cdot \frac{\ell^2}{12}. \quad (2.43)$$

Die Näherungen der konstanten Massenverteilung ($J_{\Theta}^S = m \cdot \ell^2 / 12$) und der Vernachlässigung des rückstellenden Moments ($m \cdot g \cdot z_S \ll k_g$) führen zu den Lösungen

$$x_S = X_S \cdot \sin(\Omega t + \alpha), \quad X_S = \frac{F}{\sqrt{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2}}, \quad (2.44)$$

$$\vartheta = \theta \cdot \sin(\Omega t + \alpha), \quad \Theta = 6 \cdot \frac{2 \cdot z_F - \ell}{\ell^2} \cdot X_S, \quad (2.45)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{k - m \cdot \Omega^2}{c \cdot \Omega}\right). \quad (2.46)$$

Die Amplitude der Bewegung der Rüttlerspitze lässt sich wie folgt abschätzen

$$A = \left(6 \cdot \frac{z_F}{\ell} - 2\right) \cdot \frac{F}{\sqrt{(k - m \cdot \Omega^2)^2 + c^2 \cdot \Omega^2}}. \quad (2.47)$$

2.3.2.3 Vergleich von Fundament- und Pfahlmodell

Sowohl mit dem Fundament- als auch mit dem Pfahlmodell lassen sich Näherungslösungen für die Amplitude eines Rüttlers in der Luft sowie im Boden ermitteln. FELLIN (2000) schätzt die beiden Modelle bezüglich ihrer Rechengenauigkeit als gleichwertig ein. Als Voraussetzung dafür müssen die technischen Daten des Rüttlers bekannt sein. Die Parameterwerte für Federsteifigkeit und Dämpfung können entweder berechnet oder der Literatur entnommen werden (z.B. DAS (1983), GAZETAS (1991) oder WOLF (1994)).

Das Pfahlmodell bietet den Vorteil einer Rückführung des Rüttlers auf einen Einmassenschwinger, wodurch eine einfache analytische Betrachtung des Gesamtsystems erfolgen kann. Das Fundamentmodell besitzt aufgrund der vier von der Lagerungsdichte abhängigen Parameter (k, c, k_g, c_g), im Gegensatz zu nur zweien beim Pfahlmodell (k_x, c_x), den Vorteil, dass die Rückrechnung auf die Lagerungsdichte zuverlässigere Ergebnisse verspricht. Die Ergebnisse bei Rückrechnung der Bodenkennwerte aus der

Amplitude und der Phasenverschiebung können stark differieren, da bereits kleine Amplitudenveränderungen die Bodenparameter wesentlich beeinflussen.

2.3.2.4 Bodenreaktionskraft

Der sich im Boden auf einer Kreisbahn bewegend Rüttler wird durch die um den Winkel φ vorseilende rotierende Unwuchtmasse in Schwingung versetzt. Der Vorlaufwinkel φ liegt zwischen 0 und π und ergibt sich wie folgt:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad [\text{rad}] . \quad (2.48)$$

Ohne die Einwirkung einer Dämpfung ($c = 0$) und bei einem Frequenzverhältnis von $\eta = \Omega / \omega < 1$ beträgt der Vorlaufwinkel $\varphi = 0$. Für $\eta > 1,0$ stellt sich ein Vorlaufwinkel von $\varphi = \pi$ ein. Ist das System gedämpft ($c > 0$) und liegt die Erregerfrequenz unter der Systemeigenfrequenz ($\eta < 1$), nimmt der Vorlaufwinkel einen Wert zwischen 0 und $\pi/2$ an. Ist die Erregerfrequenz größer als die Eigenfrequenz des Systems ($\eta > 1$), liegt der Winkel φ zwischen $\pi/2$ und π . Bei der Erregung mit der Systemeigenfrequenz ($\eta = 1$) beträgt der Vorlaufwinkel $\pi/2$.

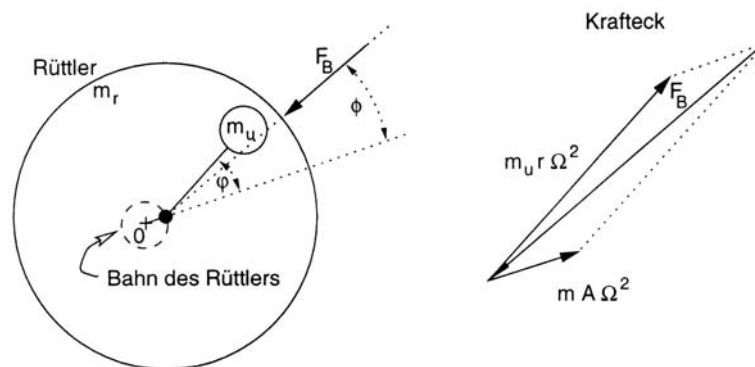
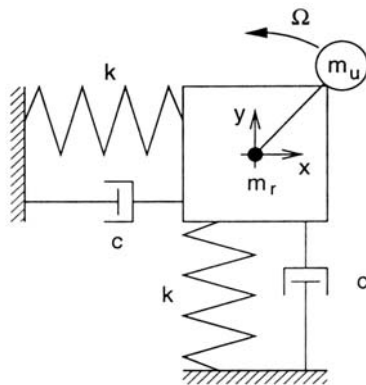


Bild 2.19: Darstellung der Kräfteverteilung im viskoelastischen Halbraum aus FELLIN (2000)

Zur Abschätzung der in den Boden eingeleiteten Kraft kann nach FELLIN (2000) ein zweidimensionales Feder-Dämpfer-Ersatzsystem verwendet werden. Die jeweiligen Komponenten der Bodenreaktionskraft F_B in x- und y-Richtung wirken in den Federn und Dämpfern des Systems. Aus ihnen ergibt sich die Resultierende F_B , die in Richtung des Rüttlermittelpunktes gerichtet ist. Aus den beiden entkoppelten Differential-

gleichungen für das betrachtete System lassen sich die Einzelkomponenten der Bodenkraft wie folgt berechnen:



$$F_{Bx}(t) = A \cdot \sqrt{k^2 + c^2} \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\Omega \cdot t + \alpha + \phi) \quad [\text{kN}], \quad (2.49)$$

$$F_{By}(t) = A \cdot \sqrt{k^2 + c^2} \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\Omega \cdot t + \alpha + \phi) \quad [\text{kN}]. \quad (2.50)$$

Bild 2.20: Feder-Dämpfer-Ersatzsystem aus FELLIN (2000)

Für $t = 1$ [s] ergibt sich aus den Gleichungen 2.50 und 2.51 die resultierende Bodenkraft F_B zu:

$$F_B = \sqrt{F_{Bx}^2 + F_{By}^2} \quad [\text{kN}]. \quad (2.51)$$

2.4 Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung durch das RDV

Bei Verdichtungsvorgängen in nicht bindigen Böden stellen sich im Zuge der Kornumlagerung plastische Verformungen ein. Tiefenrüttler verursachen insbesondere in ihrem Nahbereich große Verformungen, die mit zunehmender Entfernung abnehmen. Der den Rüttler umgebende Boden kann hierbei vereinfachend in drei verformungsabhängige Verdichtungsbereiche unterteilt werden.

I. Plastischer Bereich:

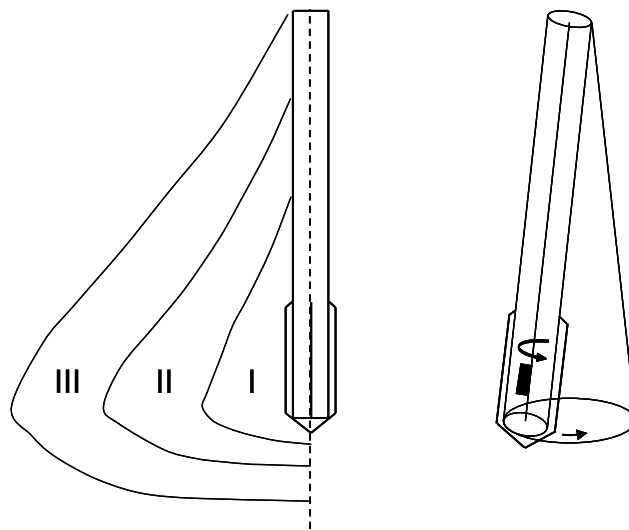
Der den Rüttler unmittelbar umgebende Boden befindet sich im Versagenszustand (Bodenverflüssigung) und weist Schubverzerrungen von $\gamma > 10^{-1}$ auf.

II. Elastisch-Plastischer Bereich:

In diesem Bereich liegen die Schubverzerrungen zwischen $10^{-3} \leq \gamma \leq 10^{-1}$ und es kommt zu teilweise plastischen Verdichtungseffekten.

III. Elastischer Bereich:

Die auftretenden Schubverzerrungen im elastischen Bereich liegen bei $\gamma < 10^{-3}$ und es treten keine bleibenden Gestaltsveränderungen des Bodens auf.



a) Verformungsbereiche

b) idealisierte Rüttlerbewegung

Bild 2.21: Verformungsbereiche um den Tiefenrüttler in Anlehnung an Massarsch (2002a)

Da die Bodenverflüssigung ein wesentlicher Vorgang zur Beschreibung der Rütteldruckverdichtung in wassergesättigten nicht bindigen Böden darstellt, werden die Grundlagen hierzu im folgenden Kapitel zusammengefasst.

2.4.1 Bodenverflüssigung

Die Ursache für die Kornumlagerung bei locker gelagerten und wassergesättigten Böden liegt in einer kreisförmig um den Rüttler auftretenden Bodenverflüssigung. Allgemein versteht man unter dem Begriff der Bodenverflüssigung den Prozess der Umformung eines wassergesättigten Bodens in einen flüssigen Zustand (GROOT et al., 2004). Die totalen Spannungen σ eines wassergesättigten Bodens setzen sich aus den auf das Korngerüst wirkenden effektiven Spannungen σ' und den neutralen Spannungen u zusammen. Bodenverflüssigung ist zurückzuführen auf eine Erhöhung des Porenwasserdruckes und einer damit verbundenen Reduzierung der effektiven Spannung bei gleich bleibender totaler Spannung (STUDER, ZIEGLER, 1986). Ursachen für solch eine Erscheinung können dynamische Belastungen sein, wie sie bei der dynamischen Bodenverdichtung oder bei Erdbeben entstehen. Eigenschaften wie eine lockere Lagerung, vollständige Wassersättigung, geringe effektive Spannungen oder eine runde Kornform begünstigen die Bodenverflüssigung.

Unter zyklischer Beanspruchung von Sandböden kann der Porenwasserüberdruck mit steigender Zyklenzahl zunehmen. Gleichzeitig reduzieren sich die effektiven Spannungen und daraus folgend die Scherfestigkeit des Bodens bis zum Erreichen des Bruchzustandes. Solange der durch die zyklische Belastung sukzessiv abnehmende Korn-zu-Korn-Druck vorhanden ist, verfügt der Boden über eine Scherfestigkeit. Die auftretenden Verformungen sind dabei relativ klein. Erreicht der Porenwasserüberdruck den Überlagerungsdruck, so reduziert sich die effektive Spannung zu Null. Der Boden weist in diesem Zustand keine Scherfestigkeit mehr auf und es können große Verformungen auftreten. Das Bild 2.22 zeigt die verflüssigungsgefährdeten Kornverteilungsbereiche.

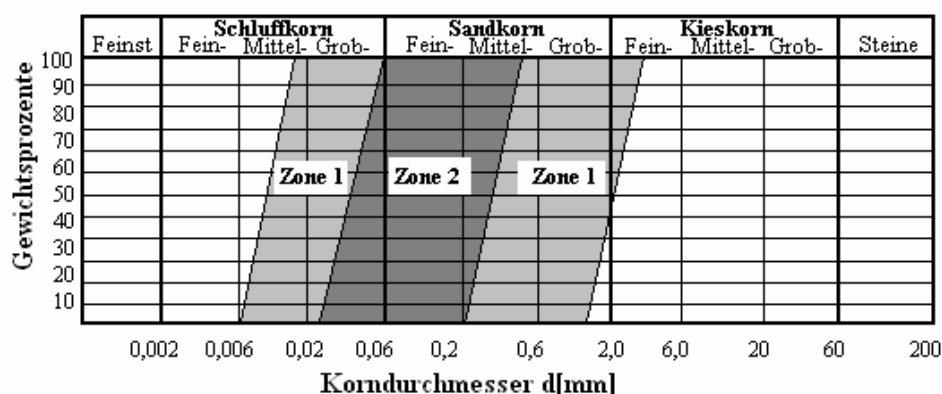


Bild 2.22: Verflüssigungsgefährdete Kornverteilungsbereiche aus KTA 2201.2 (1990)

Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen der Entwicklung des Porenwasserdruckes und der Bodenverflüssigung wird idealisiert ein Bodenelement eines locker gelagerten Sandes im Ausgangszustand betrachtet. In Bild 2.23 sind die effektive Vertikalspannung und die effektive Horizontalspannung dargestellt. Während einer dynamischen Belastung, wird dieses Bodenelement durch eine zyklische Schubspannung beansprucht.

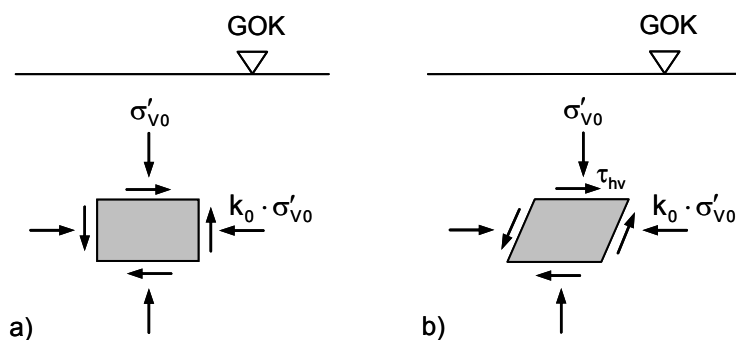


Bild 2.23: Idealisierte Belastungen, (a) Anfangsspannungszustand, (b) Zyklische Belastung (in Anlehnung an MARTIN et al., 1975)

Das Phänomen der Bodenverflüssigung wurde bereits häufig untersucht (SEED et al. (1978), MARTIN et al. (1975), KHOSLA, WU (1976)). Vor allem der zyklische Triaxialversuch wurde genutzt, um die beeinflussenden Faktoren der Bodenverflüssigung zu bewerten.

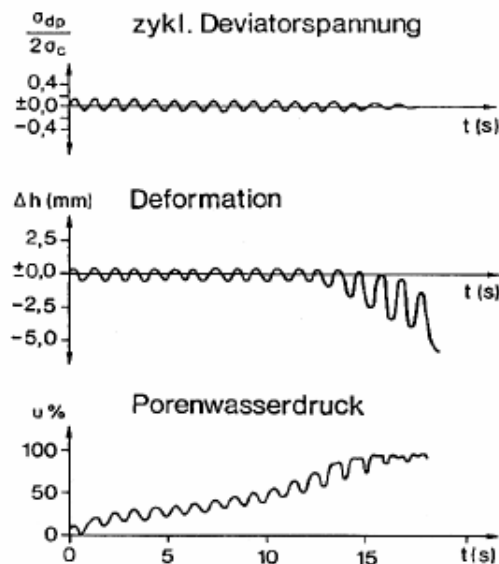


Bild 2.24: Zyklischer Triaxialversuch an locker gelagertem Sand
(STUDER, ZIEGLER, 1986)

Im einfachsten Fall werden gesättigte Bodenproben unter Umgebungsdruck konsolidiert und anschließend durch eine zyklische Deviatorspannung unter undrainierten Bedingungen belastet. Bei den dynamischen Triaxialversuchen erhöht sich der Porenwasserdruck am Ende eines jeden Spannungszyklus progressiv mit steigender Zyklenzahl (Bild 2.24). Er steigt bei Erreichen der Verflüssigung stark an, die Dehnungsamplitude nimmt dabei deutlich zu.

2.4.2 Resonanzerscheinungen in der dynamischen Bodenverdichtung

SIMONS et al. (1987) geben an, dass die Verdichtung rolliger Böden am effizientesten erfolgt, wenn das Verdichtungsgerät im Resonanzfrequenzbereich des Rüttler-Boden-Systems arbeitet. Im Vergleich zur Festigkeitslehre kann in der Geotechnik aber nicht von *einem* Resonanzfall gesprochen werden, da sich die Eigenfrequenz des Rüttler-Boden-Systems im Zuge der Dichteerhöhung des Bodens ändert. Es handelt sich vielmehr um Resonanzerscheinungen in einem Bereich, in dem die Erregerfrequenz nähe-

rungsweise der Eigenfrequenz des Rüttler-Boden-Systems entspricht. In Abhängigkeit von der vorhandenen Systemdämpfung kann für den Resonanzfall eine Amplitudenvergrößerung auftreten (vgl. Kapitel 2.3.1.3). In diesem Fall wird deutlich mehr Bewegungsenergie in ein System eingetragen, die grundsätzlich auch für eine Erhöhung der Effizienz eines dynamischen Verdichtungs Vorganges genutzt werden kann.

In der Literatur zur Bodenverdichtung mit Vibrationswalzen ist ebenfalls ein Zusammenhang zwischen der Erregerfrequenz und der Resonanzfrequenz zu finden. Resonanzschwingungen bei Vibrationswalzen stellen sich bei einer Erregerfrequenz zwischen 13 Hz und 27 Hz ein (FLOSS, 2001). In Tabelle 2.3 sind die empirisch ermittelten Eigenfrequenzen unterschiedlicher, nicht bindiger Böden aus verschiedenen Literaturquellen zusammengetragen. KIRSCH, SONDERMANN (2001) geben an, dass sich Sande und Kiese bei der RDV am wirkungsvollsten mit Erregerfrequenzen zwischen 25 Hz und 30 Hz verdichten lassen.

Tabelle 2.3: Empirisch ermittelte Eigenfrequenzen nichtbindiger Böden der Literatur

Quelle	Bodenart	Eigenfrequenz [Hz]
HARTUNG (1994)	trockener Sand	27
	wassergesättigter Sand, mit $D = 0,25$	55
	wassergesättigter Sand, mit $D = 0,36$	63
	wassergesättigter Sand, mit $D = 0,39$	70
PÖSCH, IKES (1975)	gleichförmiger Mittelsand	33
	nasser Mittelsand	24
	trockener Küstensand	22
	sandiger Kies	24 - 29
FISCHER (1975)	weitgestufte Kies-Sand-Gemische	24 - 29
	enggestufter Sand	33
	enggestufter, trockener Sand	22
	enggestufter, nasser Sand	24
LORENZ (1960)	feiner Sand	24
	ungleichförmiger Sand	27
	gleichförmiger Mittelsand	24

Für Oberflächenverdichtungssysteme zeigt die Auswertung der Literatur, dass die Eigenfrequenz des Bodens im Mittel bei ca. 25 Hz liegt. Abweichend davon ermittelt HARTUNG (1994) bei der Untersuchung der Tragfähigkeit von Ramppfählen, in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Sättigung, deutlich höhere Eigenfrequenzen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass für Tiefenrüttler, in Analogie zu den von Hartung untersuchten Pfählen, weitere Einflüsse auf die Eigenfrequenz des Bodens zu berücksichtigen sind.

2.4.2.1 Modell der mitschwingenden Bodenmasse

Bereits HERTWIG ET AL. (1933) und LORENZ (1960) haben eine Resonanztheorie für die Bodendynamik entwickelt, die auf dem Ansatz der mitschwingenden Bodenmasse basiert. Die Bodenmasse wird dabei gekoppelt mit dem Schwingergewicht betrachtet.

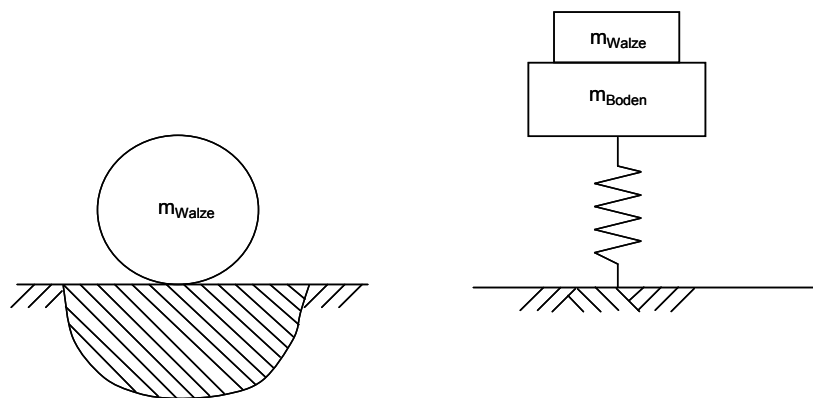


Bild 2.25: Modell der mitschwingenden Bodenmasse nach LORENZ (1960)

In diesem Modell wird von einer linearen Theorie ausgegangen, in der für die Eigenfrequenz des Bodens gilt:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [1/s] . \quad (2.52)$$

Es gilt: k : Federsteifigkeit
 m : schwingende Masse

Wird die Amplitude vergrößert, werden mehr Bodenteilchen in Bewegung gesetzt und dies bewirkt eine ansteigende mitschwingende Bodenmasse und somit ein Absinken

der Eigenfrequenz des Bodens ω_0 (vgl. Gleichung 2.52). Die Voraussetzung für die Kopplung der beiden Massen ist das Prinzip des Auflastrüttlers.

NOVAK (1957) findet durch Messung heraus, dass die dynamische Bodenpressung mit steigender Amplitude degressiv ansteigt. Hieraus leitet er eine Abnahme der Federsteifigkeit mit steigender Amplitude ab, die eine Reduktion der Eigenfrequenz bewirkt. KRÖBER (1988) begründet das Absinken der Eigenfrequenz mit dem Abheben der Walze vom Boden bei zunehmender Bodensteifigkeit. Bei steifem Boden befindet sich das Verdichtungswerkzeug länger in der Luft und die Bodenkontaktzeit wird somit kürzer. Dieser Zusammenhang wird in Bild 2.26 anhand einer Kraft-Weg-Darstellung für Böden unterschiedlicher Steifigkeit verdeutlicht.

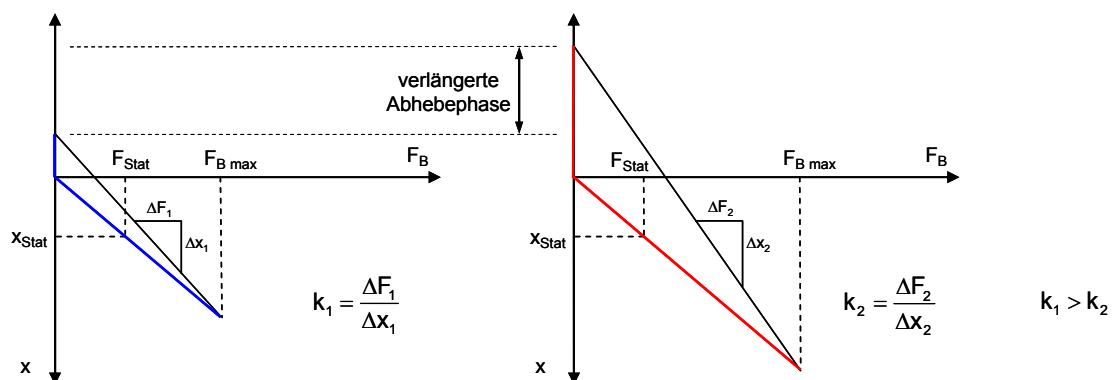


Bild 2.26: Absinken der scheinbaren Federsteifigkeit infolge Amplitudenvergrößerung in Anlehnung an KRÖBER (1988)

In der Rotationsbewegung des Tiefenrüttlers im Boden kommt es zwar auch zu einem zyklischen Lösen des Rüttlers von der Lochwandung, aber durch die horizontal gerichtete Rüttlerbewegung gibt es keine durch Gravitation beeinflusste Sprungphase. Zudem wird die Rüttlerbewegung durch den Kontakt mit der gegenüberliegenden Lochwand beeinflusst.

2.4.2.2 Einflussfaktoren auf die Resonanzfrequenz

Nach SIMONS et al. (1987) ist die Eigenfrequenz des Bodens von mehreren Parametern abhängig. Während des Verdichtungsprozesses ändert sich die Dichte und demzufolge die Steifigkeit des Bodens fortlaufend. Ein stationärer Zustand stellt sich erst dann ein, wenn mit der dynamischen Energie des Rüttlers keine weitere Verdichtung

bzw. Kornumlagerung erzielt werden. Es stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein.

Während des Verdichtungsprozesses ändert sich die Eigenfrequenz des Bodens. Soll der Resonanzzustand möglichst lange aufrecht erhalten bleiben, müsste die Erregerfrequenz fortlaufend an die aktuelle Resonanzfrequenz des Bodens angepasst werden. Erfolgt die Verdichtung mit einer konstanten Erregerfrequenz, kann sich nur kurzzeitig Resonanz im Rüttler-Boden-System einstellen. Bild 2.27 zeigt die Änderung der Eigenfrequenz in Abhängigkeit von der Amplitude, der Frequenz und der Exzentermasse für Oberflächenverdichter.

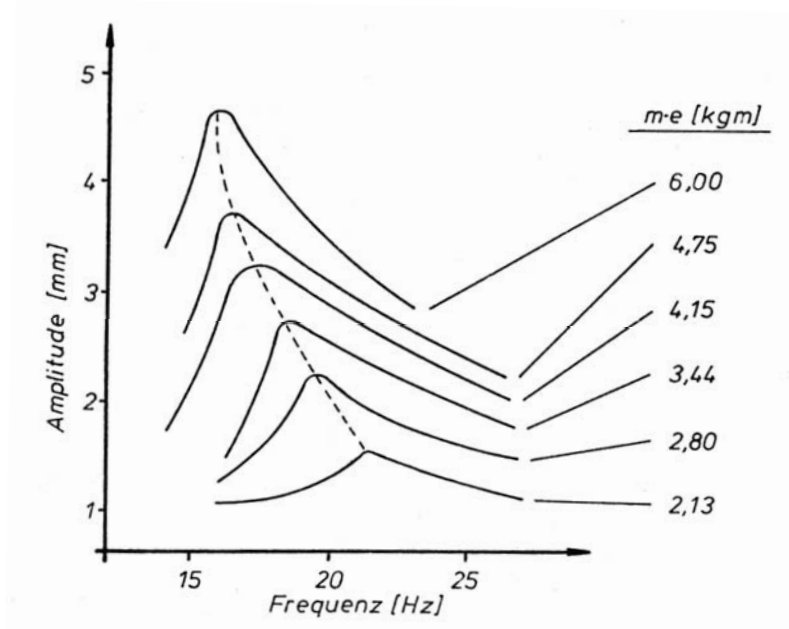


Bild 2.27: Änderung der Eigenfrequenz bezüglich der Amplitude und der Exzentermasse aus FLOSS (2001)

Liegt ein Vorlaufwinkel von $\varphi = 90^\circ$ vor, resultiert aus der Erfüllung dieser Bedingung nicht notwendig ein Resonanzzustand mit Amplitudenüberhöhung. Nur die Kenntnis der veränderlichen Zustandsgrößen des Bodens und eine hierauf basierende Abstimmung der Betriebsparameter des Rüttlers bietet die Möglichkeit, die Amplitudenvergrößerungen zielgerichtet einzusetzen.

Auf Grundlage der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Modelle sind für die Beschreibung der Rütteldruckverdichtung weitere Einflussgrößen in der Rüttler-Boden-Interaktion zu berücksichtigen. Für den instationären Zustand während der Verdichtung erhöht sich die

Lagerungsdichte des Bodens. Mit zunehmender Dichte und Steifigkeit, verringern sich wiederum die Dämpfungseigenschaften des Bodens. Infolge dessen erhöhen sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Scher- und Druckwellen. In der Konsequenz erhöht sich die Bodeneigenfrequenz. Untersuchungen von MASSARSCH (2002a) bestätigen, dass auch bei der Anwendung des MRC-Verfahrens (vgl. Kap. 2.5.2) die Resonanzfrequenz mit zunehmender Dichte des Bodens ansteigt.

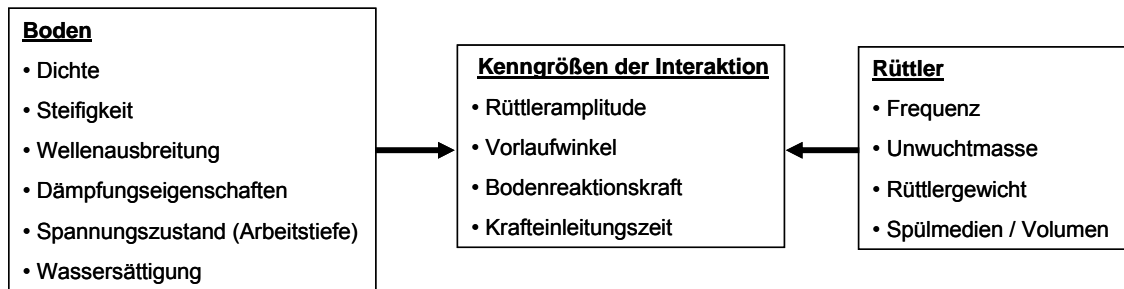


Bild 2.28: Einflussgrößen auf die Rüttler-Boden-Interaktion

Als ein wesentlicher Unterschied zwischen den dynamischen Mechanismen der Oberflächenverdichter und Tiefenrüttler ist der Spannungszustand infolge Bodenauflast zu sehen, der beim Tiefenrüttler von der jeweiligen Arbeitstiefe abhängig ist. Mit zunehmender Tiefe erhöht sich die Resonanzfrequenz des Bodens. Darüber hinaus werden für die analytischen Ersatzmodelle der Oberflächenverdichter eindimensionale Feder-Dämpfer-Systeme gewählt. Für die Tiefenrüttler ist ein zumindest ebenes Ersatzmodell, bei Annahme eines rotationssymmetrischen Systems, zu wählen.

Die Ausnutzung von Resonanzzuständen ist für das Rütteldruckverfahren bisher nicht wissenschaftlich unter reproduzierbaren Bedingungen untersucht worden. Deshalb hat eine aktive Mess- und Regelungstechnik für Tiefenrüttler noch keinen Eingang in die Ausführungspraxis gefunden. Entsprechend wird die Rütteldruckverdichtung in der Regel vereinfachend mit konstanten Frequenzen durchgeführt.

2.4.2.3 Untersuchungen zu Resonanzzuständen mit Tiefenrüttlern

WEHR (2005b) hat Berechnungen für die Rütteldruckverdichtung durchgeführt, in denen die Variation der Frequenz zur Optimierung des Verfahrens untersucht wurde. Auf der Grundlage des Fundamentmodells (vgl. Kap. 2.3.2.1) nach FELLIN (2000) bestimmt WEHR (2005b) rechnerisch die möglichen Resonanzzustände für unterschiedliche Rütt-

lertypen und Betriebsfrequenzen. Als Kriterium für den Resonanzzustand dient dabei die Bedingung $\varphi = 90^\circ$. Entsprechend dem Berechnungsmodell sind Betriebszustände, in denen das genannte Kriterium erfüllt ist, von der Frequenz, der Lagerungsdichte des Bodens und der Arbeitstiefe des Rüttlers abhängig (Bild 2.29). Angaben bezüglich der jeweils verwendeten Unwuchtmassen und dem Rüttlergewicht wurden nicht gemacht.

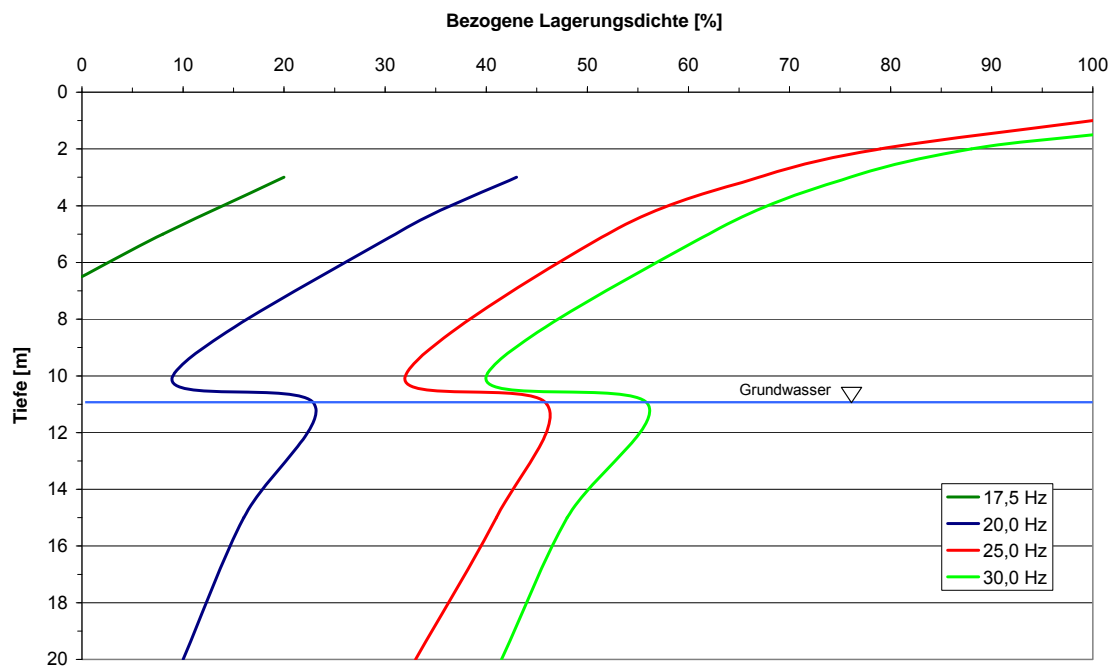


Bild 2.29: Resonanzzustände für unterschiedliche Rüttler und Frequenzen nach WEHR (2005b)

In Bild 2.30 wird deutlich, dass die Resonanzfrequenz im unteren Frequenzbereich durch die lockerste Lagerungsdichte begrenzt wird und im oberen Frequenzbereich durch die maschinentechnische Maximalfrequenz oder das Erreichen der Lagerungsdichte von 100 %. Auf Grundlage der durchgeführten Berechnungen sind Resonanzzustände für die Tiefenrüttler zwischen ca. 20 Hz und 40 Hz möglich.

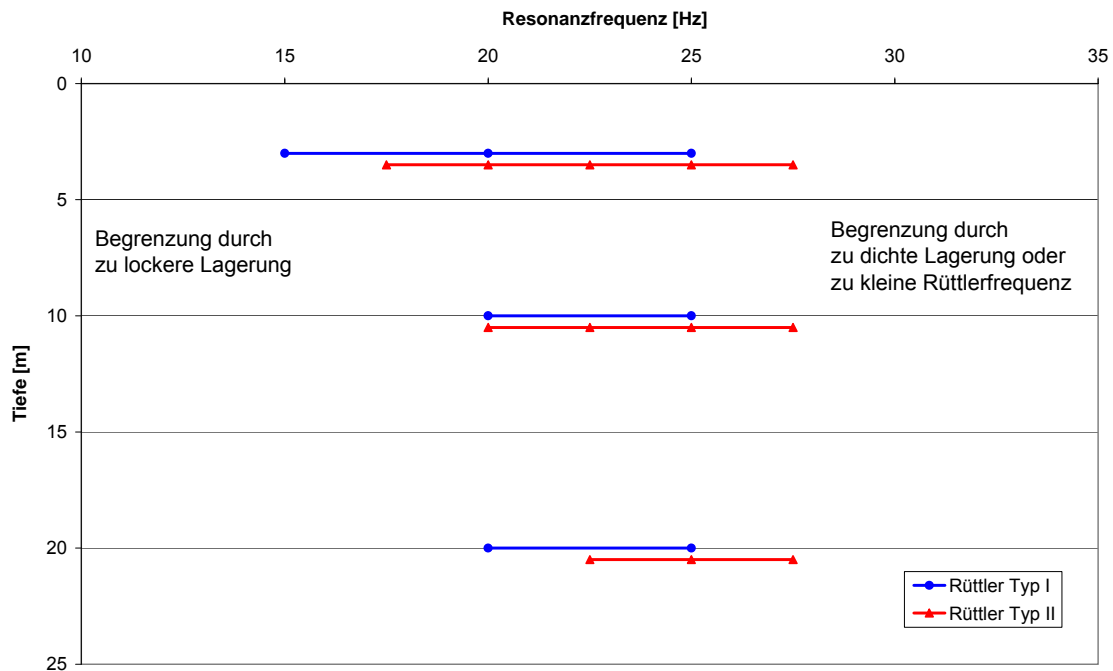


Bild 2.30: Begrenzung der Resonanzzustände nach WEHR (2005b)

Die Untersuchung von Wehr (2005b) bestätigt, dass eine einmal gefundene Resonanzfrequenz nicht für alle Lagerungsdichten und auch nicht für alle Tiefen gleichermaßen gilt. Ohne eine intelligente Nachregelung ist die Aufrechterhaltung des Resonanzzustandes zufällig. Bei exemplarischen Messungen an Tiefenrüttlern konnten bisher keine signifikanten Amplitudenüberhöhungen gemessen werden.

2.5 Aktive Regelung von dynamischen Bodenverdichtungssystemen

2.5.1 Mess- und Regelungstechnik der Oberflächenverdichtungssysteme

Bereits seit einigen Jahren werden im Zuge der Qualitätssicherung der dynamischen Oberflächenverdichtung verschiedene Verfahren der systemintegrierten Verdichtungskontrolle angewandt. Physikalische Grundlage ist hierbei der Zusammenhang zwischen dem statischen Verformungsmodul und der dynamischen Federsteifigkeit des Bodens. Eine ansteigende Federsteifigkeit ermöglicht einen erhöhten Energietransport vom vibrierenden Walzenkörper in den zu verdichtenden Boden. Aus diesem Grund ist die vom Verdichtungswerkzeug in den Boden abgegebene Verdichtungsleistung ein Maß für die Steifigkeit des Untergrundes.

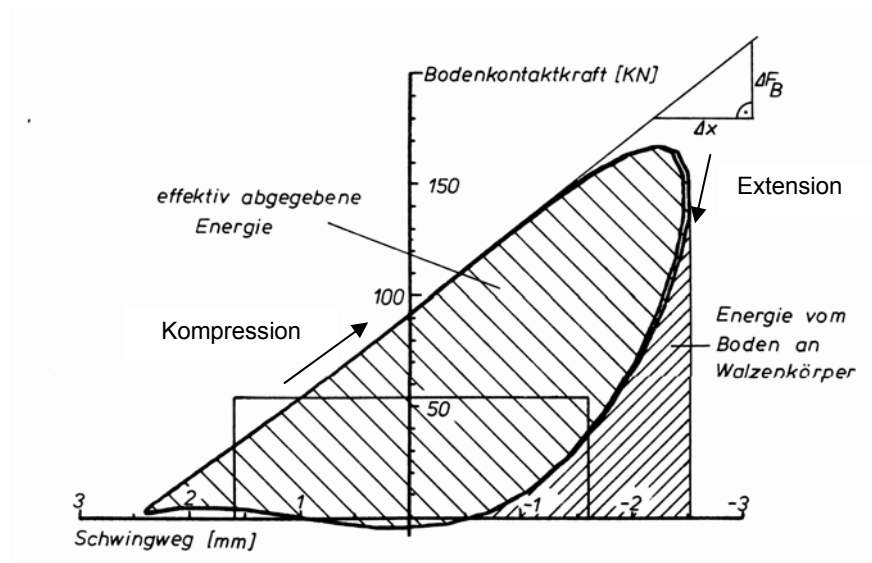


Bild 2.31: Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit vom Schwingweg der Walzenbandage im Indikatordiagramm nach FLOSS (2001)

Die durch ein integriertes Messsystem ermittelte Kontaktkraft zwischen Walze und Boden sowie der über Beschleunigungsaufnehmer errechnete Schwingweg können in einem Kraft-Weg-Diagramm dargestellt werden (Bild 2.31). Anhand der Steigung des Kompressionspfades lässt sich die dynamische Federsteifigkeit des Bodens ermitteln, die als indirektes Maß des Verdichtungszustandes dient (FLOSS, 2001).

In der Praxis wird die Bodensteifigkeit auch durch den dynamischen Verformungsmodul E_{dyn} beschrieben. Über diese Messgröße, die weitgehend unabhängig von den Maschinenparametern ist, kann die Bodensteifigkeit kontinuierlich erfasst werden und eine Anpassung der in den Boden eingeleiteten Verdichtungsenergie über die Amplitudenregulation des Walzenkörpers erfolgen. Der dynamische Verformungsmodul wird als Tangentenmodul des Kompressionspfades aus dem Kraft-Weg-Diagramm ermittelt. Besitzt der Boden eine hohe Steifigkeit, wird wenig Verdichtungsenergie mit einer niedrigen Amplitude des Walzenkörpers in das Erdreich eingetragen. Überfährt die Walze einen Bereich mit geringer Bodensteifigkeit, erfolgt eine automatische Amplitudenanpassung (in diesem Fall eine Amplitudenerhöhung), wodurch mehr Verdichtungsenergie in den Untergrund induziert wird. Daraus resultiert eine gleichmäßige und effiziente Verdichtung. Eine ausführliche Beschreibung dieses Verfahrens ist in ADAM (1996) und ANDEREGG (2000) zu finden.

Eine Übertragung dieses aktiven Mess- und Regelungsverfahrens auf Tiefenrüttler konnte bisher nicht realisiert werden. Ob dies möglich ist, wird auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Modellversuche in Kapitel 3 bewertet.

2.5.2 Müller-Resonance-Compaction (MRC)

Im Zusammenhang mit der Nutzung von Resonanzerscheinungen bei Tiefenverdichtungsverfahren ist ebenfalls das Müller-Resonance-Compaction (MRC) Verfahren zu nennen. Das Prinzip des MRC-Verfahrens basiert auf dem Einvibrieren einer Rüttelbohle, die mittels eines Aufsatzrüttlers in vertikale Schwingungen versetzt und in den zu verdichtenden Boden abgesenkt wird. Im Gegensatz zum RDV und RSV, bei denen sich der im Boden befindliche Rüttler in horizontaler Richtung bewegt, wird beim MRC-Verfahren die bis zu 15 m in den Boden eintauchende Rüttelbohle über den oberhalb der Geländeoberkante verbleibenden Aufsatzrüttler in vertikaler Richtung erregt. Über die Mantelreibung werden die Schwingungen in den umgebenden Boden übertragen. Öffnungen in den Stegen der Rüttelbohle begünstigen eine Verzahnung mit dem Boden und somit den Eintrag von Scherwellen in den Untergrund (KIRSCH, SONDERMANN, 2001).

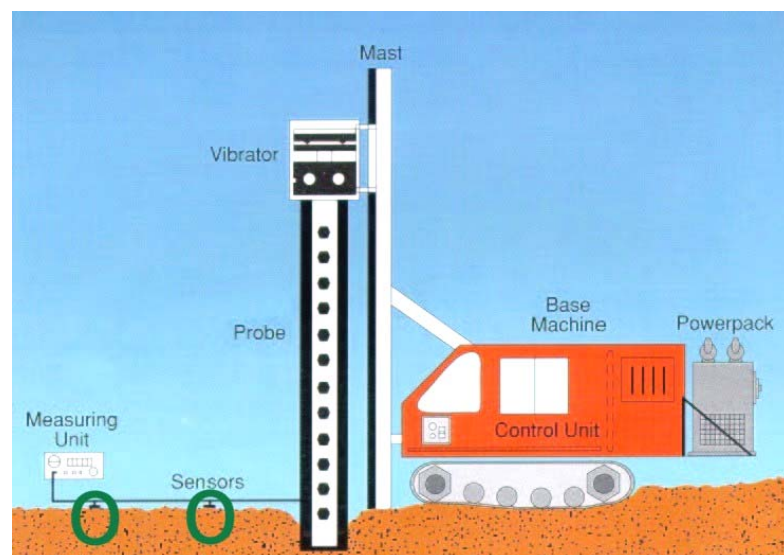


Bild 2.32: Schematische Darstellung der Mess- und Regelungstechnik beim MRC-Verfahren (MASSARSCH, FELLENIUS, 2002b)

Das Einvibrieren erfolgt mit einer vergleichsweise hohen Frequenz (~ 25 Hz), um den Boden möglichst wenig vorzuverdichten. Hat die Rüttelbohle ihre vorgesehene Tiefe erreicht, wird die Rüttelfrequenz auf etwa 16 Hz verringert, wodurch eine Verdichtung unter Nutzung von Resonanzeffekten (vgl. Kapitel 2.4.2) zwischen Rüttelbohle und Boden erreicht werden soll. Mit Hilfe einer Messtechnik, bestehend aus zwei oder mehreren auf der Oberfläche angeordneten Geophonen zur Schwingungsmessung, wird angestrebt, die Rüttelfrequenz an die sich während des Verdichtungsvorgangs ändernde Eigenfrequenz des Bodens anzupassen, um somit das Rüttler-Boden-System kontinuierlich nahe dem Resonanzzustand zu halten (MASSARSCH, FELLENIUS, 2002b).

Ein wesentlicher Nachteil der Messtechnik beim MRC-Verfahren besteht darin, dass die Schwinggeschwindigkeit lediglich an der Oberfläche und nur in vertikaler Richtung erfasst wird. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist jedoch tiefenabhängig, so dass an der Oberfläche eine andere Ausbreitungscharakteristik erfasst wird, als in tieferen Bodenschichten. Die Sensoren erfassen die Oberflächenwellen und somit nicht zwangsläufig die Resonanzeffekte, die für das Schwingverhalten der Rüttelbohle im Untergrund und für den maßgeblichen Verdichtungs Vorgang repräsentativ sind.

3 Modellversuche zur Untersuchung der bodendynamischen Mechanismen der Tiefenverdichtung

3.1 Zielsetzung und Methodik

Die Verdichtungsleistung eines Tiefenrüttlers wird durch eine große Anzahl von Maschinen-, Verfahrens- und Bodenparametern bestimmt (vgl. Kap 2.2.3). Hierbei stehen der Rüttler und der anstehende Boden in einer fortlaufenden Interaktion miteinander. Im Zuge des Verdichtungsvorganges ändern sich durch den Dichte- und Steifigkeitszuwachs die dynamischen Eigenschaften des Bodens. Die Rüttlerfrequenz und die Unwuchtmasse sind die wesentlichen Maschinenparameter, die für eine aktive Beeinflussung der Rüttler-Boden-Interaktion genutzt werden können.

Eine Zielsetzung der Untersuchung besteht darin, den Einfluss dieser Maschinenparameter auf die erzielbare Verdichtung und deren räumlichen Ausbildung durch die Auswertung von Modellversuchen zu beschreiben. Um eine Vergleichbarkeit der Verdichtungsversuche untereinander gewährleisten zu können, ist es erforderlich, den Modellboden vor jedem Verdichtungsversuch mit der gleichen Lagerungsdichte einzubauen und nach jedem Versuch eine reproduzierbare Art der Verdichtungskontrolle zu realisieren.

Auf der Grundlage der in Kapitel 2.4 vorgestellten Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung, wird eine besonders effiziente Verdichtung durch die Weckung von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System sowie durch Bodenverflüssigung herbeigeführt. Diese Mechanismen werden deshalb ebenfalls im Rahmen von Modellversuchen untersucht. Zielsetzung hierbei ist es zu bewerten, unter welchen Randbedingungen die Mechanismen der Resonanz und der Bodenverflüssigung bei der Rütteldruckverdichtung auftreten und ob diese durch die Steuerung der Betriebsparameter zur Effizienzsteigerung des Verfahrens gezielt herbeigeführt werden können.

3.2 Modelltheorie

Um die Abhängigkeit der Verfahrensparameter der Rütteldruckverdichtung auf das Verdichtungsergebnis unter definierten Randbedingungen zu untersuchen und generelle Mechanismen unter der dynamischen Einwirkung dokumentieren zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Modellversuche durchgeführt. Die Möglichkeit bodenmechanische und dynamische Vorgänge im verkleinerten Modell zu untersuchen, beruht auf dem allgemeinen Ähnlichkeitsprinzip. Modellversuche lassen sich nach PREGL (1998) in folgende Gruppen einteilen:

I. Demonstrations-Modellversuche

Die Auswertung erfolgt hier qualitativ. Diese Versuche dienen der Veranschaulichung von grundsätzlichen Vorgängen und Zusammenhängen.

II. Modellversuche zur Ermittlung von Mechanismen

Diese Versuche werden durchgeführt, um für unterschiedliche Konstruktionen und Verfahren die Mechanismen von Spannungs- und Verformungszusammenhängen als auch Bruchmechanismen zu untersuchen. Man erhält Vergleichswerte für rechnerische Modelle und kann diese daran überprüfen. Die Gleichungen, die das Verhalten im Modell beschreiben, gelten in gleicher Weise für die Natur (Prototyp), wenn die Übertragbarkeit der maßgeblichen Mechanismen gewährleistet ist.

III. Modellversuche zur Übertragung von Ergebnissen auf die Natur (Prototyp)

Hierbei werden aus experimentell aufgenommenen Messwerten unmittelbar quantitative Aussagen zum Prototyp abgeleitet. Eine derartige Übertragung ist möglich, wenn das Modell dem Prototyp mechanisch äquivalent ist.

In der Modelltheorie bedeutet das Ähnlichkeitskriterium III, dass Modell und Natur nicht nur geometrisch sondern auch kinematisch und dynamisch ähnlich sind. Die maßgeblichen Modellgesetze können abgeleitet werden, indem aus den systemrelevanten Parametern dimensionslose Produkte ermittelt werden, die sowohl im Modell wie in der Natur (Prototyp) den gleichen Zahlenwert annehmen.

Die geforderte Äquivalenz zwischen Modell und Natur wird eingehalten, solange diese Parameter vom Spannungszustand unbeeinflusst sind. Diese Annahme trifft jedoch nur für begrenzte Druckniveaus zu. Nach GUDEHUS (1980) ist der Einfluss aus der Span-

nungsdifferenz zwischen Modell und Natur bei rolligen Böden bis $\sim 1000 \text{ kN/m}^2$ vernachlässigbar gering. Die Ähnlichkeitsanforderungen werden erfüllt, solange dieses Spannungsniveau nicht überschritten wird. Es wird in diesem Zusammenhang auch von der „Selbstähnlichkeit“ des rolligen Bodens gesprochen.

Weitere dimensionsbehaftete bodendynamische Bodenparameter lassen sich in der Regel nicht äquivalent auf einen anderen Maßstab abbilden. Hinsichtlich der Grundlagen der Modelltheorie sei auf die Literatur verwiesen, wie z.B. JESSBERGER (1985) oder OUMERACI (1994).

Die zahlenmäßige Übertragung der Versuchsergebnisse in die Natur ist nicht Zielsetzung der Modellversuche dieser Arbeit. Vielmehr sollen grundsätzliche Mechanismen untersucht werden, aus denen Berechnungsmodelle abgeleitet bzw. überprüft werden können. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Modellversuche sind der Kategorie II nach PREGL (1998) zuzuordnen. Um eine Vergleichbarkeit der beobachteten Mechanismen mit der Natur zu gewährleisten, wurden die Modellversuche in einem großen Maßstab durchgeführt, der einem Maßstabsfaktor von $\lambda = 3$ entspricht.

3.3 Versuchseinrichtung

3.3.1 Aufbau und Konzeption des Versuchsstandes

Bei der Konzeption und Bemessung eines Modellversuchsstandes für die Abbildung der dynamischen Bodenverdichtung können Einflüsse aus der räumlichen Begrenzung des Modells nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Es ist deshalb erforderlich, in Bezug auf die Geometrie der Versuchsanlage einen Kompromiss zu definieren. Einerseits sind große Abmessungen anzustreben, damit mögliche Einflüsse der Berandung auf die Versuchsergebnisse gering sind. Andererseits ist bei sehr großen Abmessungen die Handhabung der einzubauenden Bodenmengen nicht mehr in der Form gewährleistet, dass die Einbaulagerungsdichte definiert und ausreichend homogen ist. Für die Verdichtungsversuche wurden zwei kreisförmige Betonschächte in Segmentbauweise mit einer Gesamthöhe von 3,0 m und einem Innendurchmesser von 1,20 m gewählt. Bei einer Schachtfüllhöhe von durchschnittlichen 2,0 m für die Verdichtungsversuche entspricht dies einem Sandvolumen von $\sim 2,3 \text{ m}^3$ bzw. einer Trockenmasse von $\sim 3,6 \text{ t}$.

Zur Reduzierung möglicher Einflüsse der Schachtberandung auf die Ergebnisse der dynamischen Verdichtungsversuche, wurde die Innenseite der Schächte mit schwingungsabsorbierenden Matten aus Polyurethan als konstruktive Maßnahme ausgekleidet. Dieses Dämpfungsmaterial wurde bezüglich der Dämpfungseigenschaften und Steifigkeit auf die besonderen Anforderungen in dieser Versuchsanlage abgestimmt. Das verwendete Dämpfungsmaterial zeichnet sich durch eine hohe innere Dämpfung und ein hohes Absorptionsvermögen aus. Unter Berücksichtigung der wirkenden Vorspannung infolge Erddruck und der dynamischen Einwirkung durch den Modellrüttler beträgt der mittlere Absorptionsfaktor ca. 45 %.

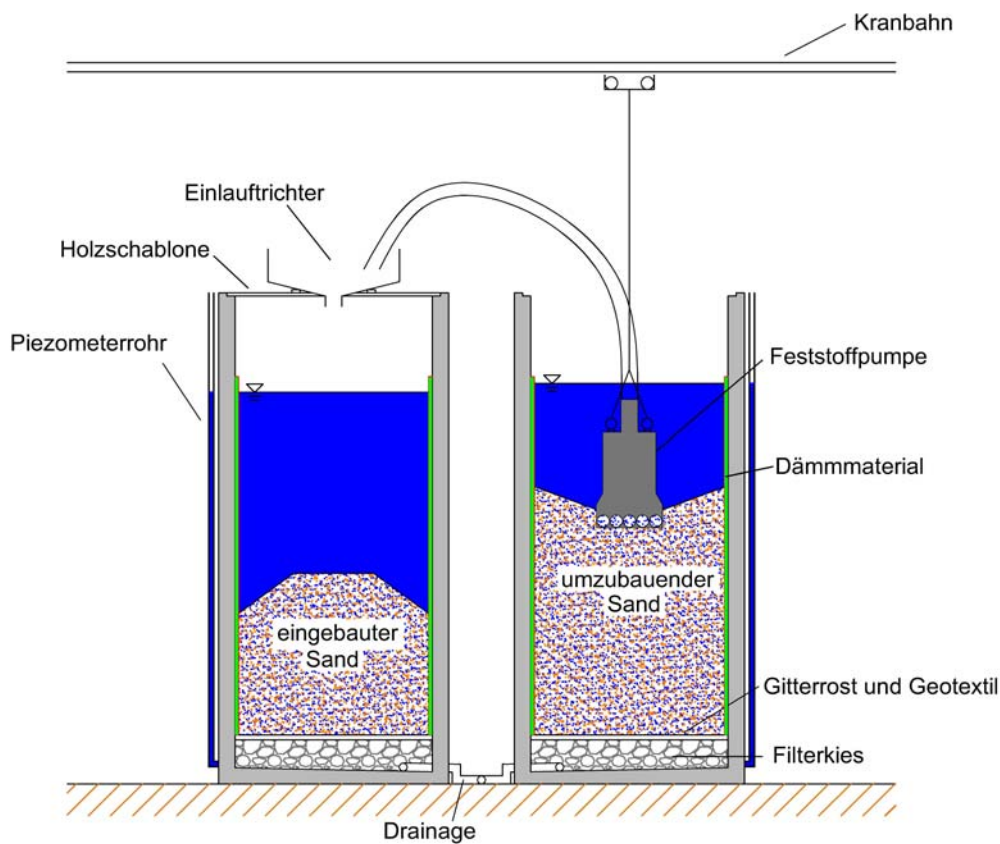


Bild 3.1: Versuchsanlage zur Durchführung von Verdichtungsversuchen

Mit der Verwendung des schwingungsabsorbierenden Dämpfungsmaterials werden Einflüsse aus der Berandung des Versuchsschachtes auf die Versuchsergebnisse reduziert. Diese können jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurde die Schwingungsübertragung auf die Versuchsschächte während der Verdichtungsversuche zusätzlich messtechnisch überwacht (vgl. Kapitel 3.3.5). Mit Hilfe dieser Messsignale konnte zudem die Dichtezunahme des Modellsandes wäh-

rend der Verdichtungsversuche bewertet werden, da mit steigender Dichte des Sandes mehr Schwingungen auf den Versuchsschacht übertragen werden.

Die Schächte besitzen über dem geneigten Behälterboden eine Entwässerungsöffnung. In den Schachtböden ist zur Drainage ein Filterkies eingebaut, der mit einem Geotextil abgedeckt ist. Dieses wird durch einen Gitterrost vor mechanischer Beanspruchung geschützt. Über ein mit Schiebern ausgestattetes Rohrleitungssystem können die beiden Schächte be- bzw. entwässert werden. Der Wasserstand in den Behältern wird an jeweils außen angebrachten Standrohren abgelesen. Oberhalb des Versuchstandes befindet sich eine Kranbahn, die für den Transport und die Positionierung der erforderlichen Geräte für den Sandeinbau und die Verdichtungsversuche eingesetzt wird (Bild 3.1).

3.3.2 Modelltiefenrüttler

Der Modellrüttler entspricht in seiner Grundkonstruktion dem Tiefenrüttler Typ T der Keller Grundbau GmbH in einem Modellmaßstab von etwa 1:3. Der Rüttler hat eine Gesamtlänge von 179,1 cm und kann bis ca. 140 cm in den Boden eingefahren werden. Der Durchmesser beträgt 10,8 cm. Am unteren Ende sind 4 Verdrehrippen angebracht, die den Rüttler in seiner Lage im Boden stabilisieren.

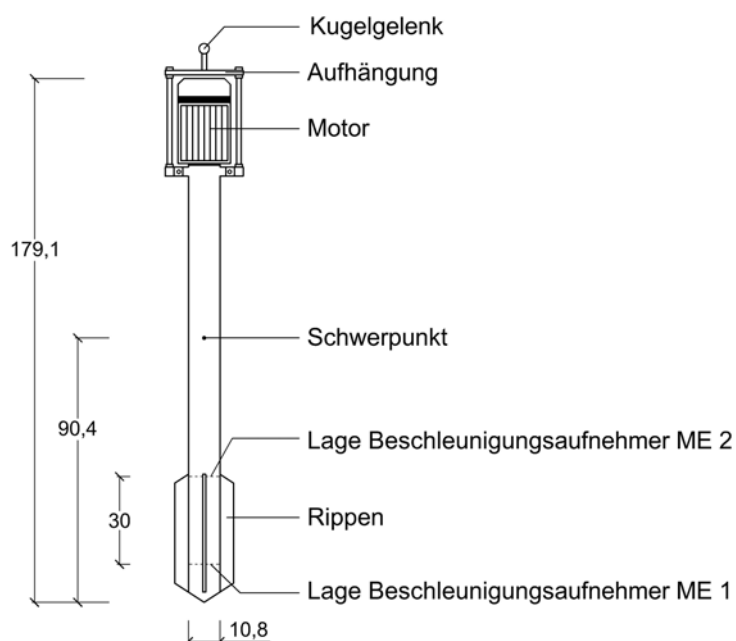


Bild 3.2: Aufbau und Geometrie des Modellrüttlers (Maße in cm)

Eine stufenlose Einstellung der Rüttlerfrequenz erfolgt über einen regelbaren Asynchron-Drehstrommotor, der außerhalb des Rüttlerkörpers am oberen Ende angebracht ist. Der einstellbare Bereich der Wellenfrequenz liegt zwischen 0 und 50 Hz. Die Aufhängung des Modellrüttlers erfolgt durch ein Kugelgelenk, das den Rüttler mit der Kranbahn oberhalb der Versuchsanlage verbindet.

Entscheidenden Einfluss auf die Verdichtungsarbeit hat die vom Rüttler erzeugte Fliehkraft, deren Größe frequenzabhängig ist sowie von der Masse der Unwucht und ihrem Trägheitsradius bestimmt wird.

Die rechnerische Ermittlung der Fliehkraft erfolgt mit:

$$F = m_u \cdot r \cdot \Omega^2 \quad [\text{kN}] . \quad (3.1)$$

Es gilt:

- m_u : Unwuchtmasse
- r : Abstand des Schwerpunktes der Unwuchtmasse von der Rüttlerachse
- Ω : Erregerfrequenz

Im Rahmen der durchgeführten Versuchsserien erfolgte eine Variation der Rüttlerfrequenz, der Unwuchtmasse und der Eintauchtiefe des Rüttlers. Es wurden vier Unwuchtmassen mit einem Gewicht zwischen 250 g und 1.000 g verwendet (Bild 3.3).

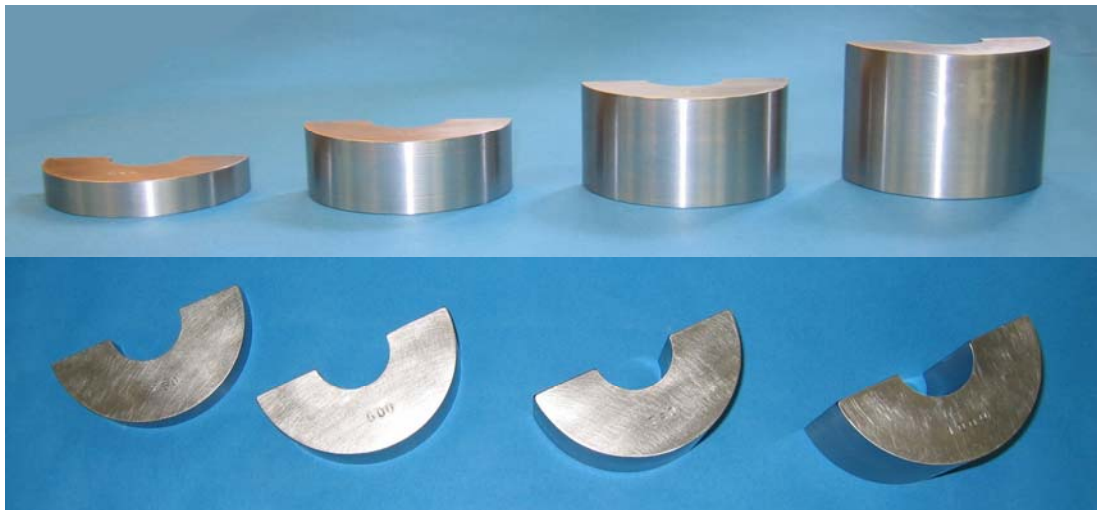


Bild 3.3: Unwuchtmassen für den Modellrüttler: 250 g, 500 g, 750 g und 1000 g

Die Fliehkraft des Rüttlers für die einzelnen Unwuchtmassen steigt mit der Frequenz quadratisch an. Die Erzeugung einer definierten Fliehkraft kann hierbei auf unterschiedliche Weise erfolgen. Dies kann entweder mit einer kleinen Unwuchtmasse und

einer hohen Rüttelfrequenz oder aber mit einer großen Unwuchtmasse und einer niedrigen Rüttelfrequenz geschehen. Der Einfluss von Rüttelfrequenz und Fliehkraft auf die erzielte Verdichtung und deren räumliche Ausbreitung wird mit den durchgeführten Verdichtungsversuchen untersucht.

Die Fliehkräfte, die mit dem Modellrüttler erzeugt werden können, sind gemäß Gleichung 3.1 in Bild 3.4 dargestellt. Beispielhaft ist eine Fliehkraft von 0,30 kN gekennzeichnet, die je nach verwendeter Unwuchtmasse mit einer Frequenz zwischen 20 Hz und 40 Hz erzeugt wird.

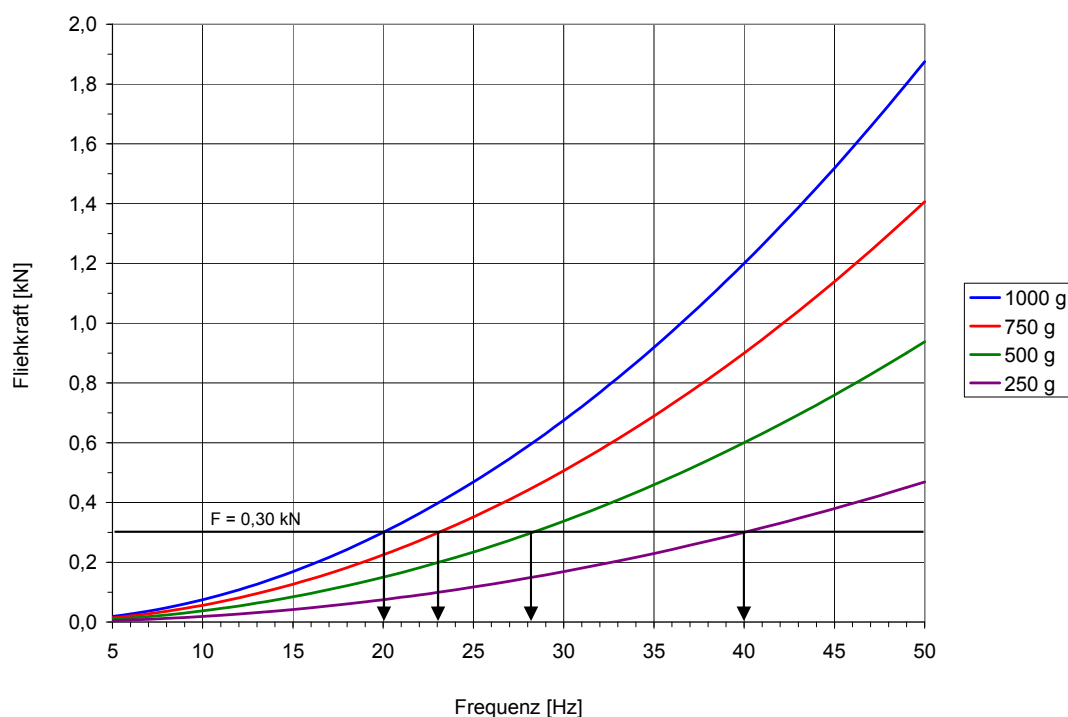


Bild 3.4: Fliehkraft des Modellrüttlers in Abhängigkeit von der Frequenz und Unwuchtmassen

3.3.3 Bodenmechanische Parameter des Modellsandes

Bei dem für die Modellversuche verwendeten Boden handelt es sich um einen gebrochenen Quarzsand, der entsprechend der in Bild 3.5 dargestellten Körnungslinie als Grobsand und Mittelsand (gS + mS bzw. SE) zu klassifizieren ist.

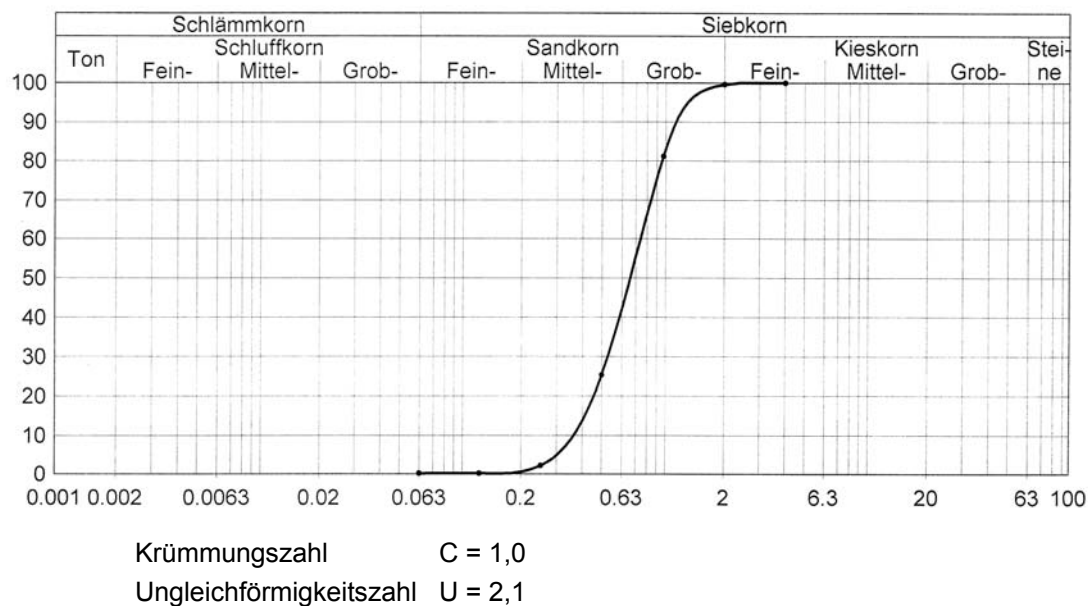


Bild 3.5: Kornverteilung des Modellsandes

Die Dichte des Sandes bei lockerster und dichtester Lagerung wurde mit dem Rüttel-
 tischversuch nach DIN 18126 bestimmt. Die Ermittlung der Reibungswinkel erfolgte in
 Triaxialversuchen mit einem Probendurchmesser von 10 cm. Die Ergebnisse der
 durchgeführten Laboruntersuchungen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Bodenmechanische Kennwerte des Modellsandes

Trockendichte		Porenanteil		Porenzahl		Reibungswinkel	
$\rho_{d,min}$ [g/cm ³]	$\rho_{d,max}$ [g/cm ³]	n_{min} [-]	n_{max} [-]	e_{min} [-]	e_{max} [-]	φ_{min} [°]	φ_{max} [°]
1,514	1,818	0,314	0,429	0,458	0,750	33	39

Die Verdichtungsfähigkeit des Modellsandes wird mit $I_f = 0,64$ [-] als gut bewertet. Der
 Durchlässigkeitsbeiwert kann nach MALLETT, PACQUANT mit $k_f = 6,0 \cdot 10^{-4}$ [m/s] abge-
 schätzt werden.

3.3.4 Einbau des Modellsandes

Vor dem Beginn der Verdichtungsversuche wurde im Rahmen von Vorversuchen eine
 Vorgehensweise erarbeitet, die den Einbau des Modellsandes mit einer reproduzierba-
 ren lockeren Lagerungsdichte gewährleistet. Dies ist eine notwendige Voraussetzung,
 um eine vergleichbare Ausgangssituation für alle Verdichtungsversuche sicherzustel-

len. Im Versuchsablauf werden die zwei Schächte der Versuchsanlage wechselweise als Versuchsschacht und als Schacht zur Zwischenlagerung des Modellsandes (im Weiteren als Arbeitsschacht bezeichnet) verwendet. Der Einbau des Modellsandes in den Versuchsschacht, erfolgt durch Einspülen als Wasser-Sand-Gemisch mit einer Feststoffpumpe. Dies geschieht mit Hilfe eines Zentriertrichters im Versuchsschacht, der einen gleichmäßigen und vom Bediener weitgehend unabhängigen Sandeinbau gewährleistet. Zur Reduzierung der Fallhöhe des Sandes, wird der Versuchsschacht mit Wasser befüllt. Hierdurch wird ein langsames Absinken des Sandes in eine möglichst lockere Lagerung erzielt. Nach dem Erreichen der Sollhöhe von 1,90 m für den Sandeinbau, wird der Wasserstand im Versuchsschacht auf das Niveau der Sandoberfläche mittels Drainage abgesenkt.

Die Überprüfung der erzielten Einbaulagerungsdichte erfolgte durch unterschiedliche Verfahren. Zum einen wurde die Dichte des Modellsandes durch ein vollständiges Auswiegen der Sandmasse im Versuchsschacht bestimmt. Zum anderen wurden mit dem Ausstechzylinderverfahren Dichtebestimmungen durchgeführt. Der Nachweis der Reproduzierbarkeit des Sandeinbaus wurde durch Mehrfachprüfungen geführt. Im Mittel betrug die Streuung der ermittelten Dichten weniger als 3 %. Mit einer Lagerungsdichte von $D \cong 0,12$ wird die Lagerung gemäß DIN 18126 als sehr locker bewertet. Die Kennwerte für den Modellsand im Einbauzustand können wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle 3.2: Kennwerte des Modellsandes für den Einbauzustand

ρ_d [g/cm ³]	n [-]	e [-]	D [-]	I _D [-]
1,55	0,415	0,709	0,122	0,140

3.3.5 Messtechnik

Für die Analyse der Rüttler-Boden-Interaktion während des Verdichtungsvorganges wurden sowohl der Modellrüttler als auch der Versuchsschacht mit unterschiedlicher Messtechnik ausgerüstet. In den Modellrüttler wurden in zwei Ebenen jeweils zwei piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer eingebaut. Die Lage der Aufnehmer ist in der Ebene um 90° verdreht, um den Beschleunigungswerten eine definierte x- bzw. y-

Richtung zuordnen zu können (vgl. Bild 3.8). Die Signale der Beschleunigungsaufnehmer werden mit Hilfe von Ladungsverstärkern verstärkt.

Durch die zweifache Zeitintegration der Beschleunigungssignale wird die Bewegung des Rüttlers ermittelt. Auf dieser Grundlage kann das Schwingverhalten und die Raumstellung des Rüttlers im Boden online bewertet werden. In Bild 3.6 ist der Zusammenhang zwischen der Beschleunigung, der Geschwindigkeit und des Schwingweges für eine Schwingung des Modellrüttlers in der Luft am Beispiel $f = 35\text{Hz}$ und $m_u = 1000\text{g}$ dargestellt. Für die harmonische Anregung lautet die mathematische Beziehung:

$$\ddot{x}(t) = a(t) = -\omega^2 \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t) , \quad (3.2)$$

$$\dot{x}(t) = v(t) = \omega \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t) , \quad (3.3)$$

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t) . \quad (3.4)$$

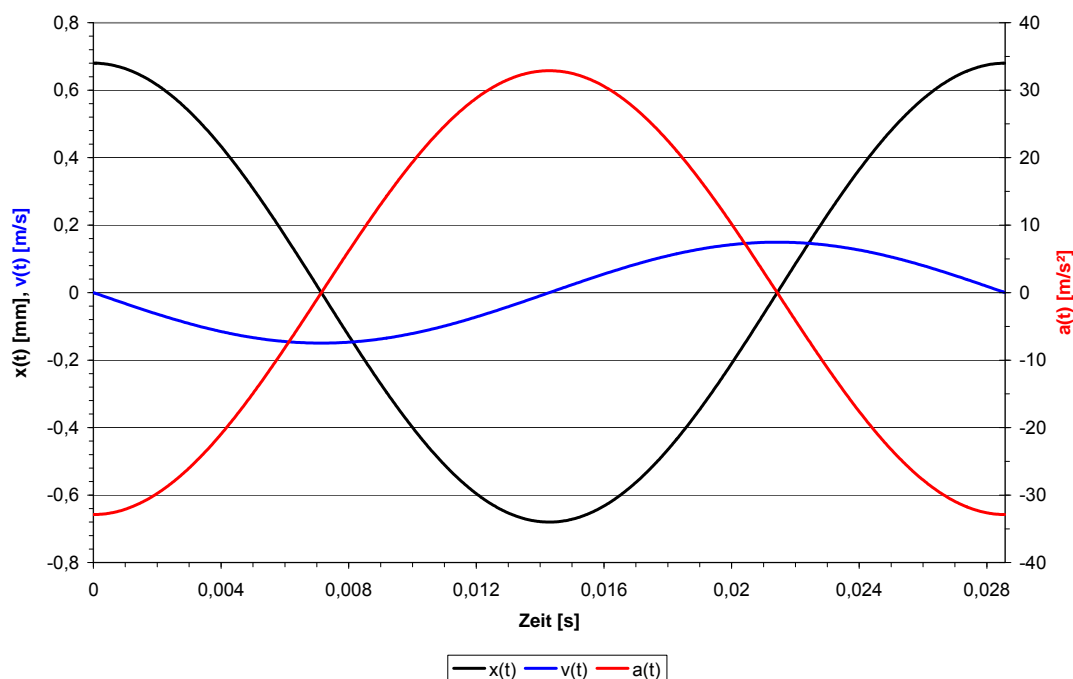


Bild 3.6: Darstellung des Weges, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Modellrüttlers für eine Schwingung in der Luft am Beispiel $m_u=1000\text{g}$, $f=35\text{Hz}$

Die Ermittlung der Rüttleramplitude durch die doppelte Integration der Beschleunigungssignale kann bei einer rein mathematischen Lösung zu Ungenauigkeiten führen. Je Integration bleibt eine Integrationskonstante unbekannt. Aus diesem Grund sind am schwingenden Rüttler in der Luft optische Messungen durchgeführt worden. Mit diesen

Messergebnissen erfolgte eine quantitative Kalibrierung der aus den Beschleunigungssignalen errechneten Amplituden.

Die Leistungsaufnahme des Rüttlermotors in den unterschiedlichen Betriebszuständen wurde mit einer gesonderten Schnittstelle an der Steuerungseinheit des Modellrüttlers erfasst. Der Asynchronmotor des Modellrüttlers gewährleistet eine Konstanzhaltung der vorgegebenen Drehfrequenz. Während des Verdichtungsvorganges kann der jeweilige Lastzustand des Motors durch die Messung der Stromstärke in der Stromzufuhr des Motors dokumentiert werden.

Alle analogen Messdaten werden mit einem hochfrequenten AD-Wandler in digitale Signale umgewandelt und in einem PC zusammengeführt. Die Frequenz der Datenerfassung beträgt 4000 Messwerte pro Sekunde. Die Steuerung des AD-Wandlers und des implementierten Multiplexers erfolgt durch eine Programmierung mit AD-Basic. Auf Grund der großen Datenmenge, die für jeden Verdichtungsversuch erfasst wurden, ist die Auswertung und Visualisierung der Daten individuell mit dem Softwaresystem *Lab-View-Diadem* programmiert worden. In der programmierten Applikation werden alle erfassten Messsignale online dargestellt.

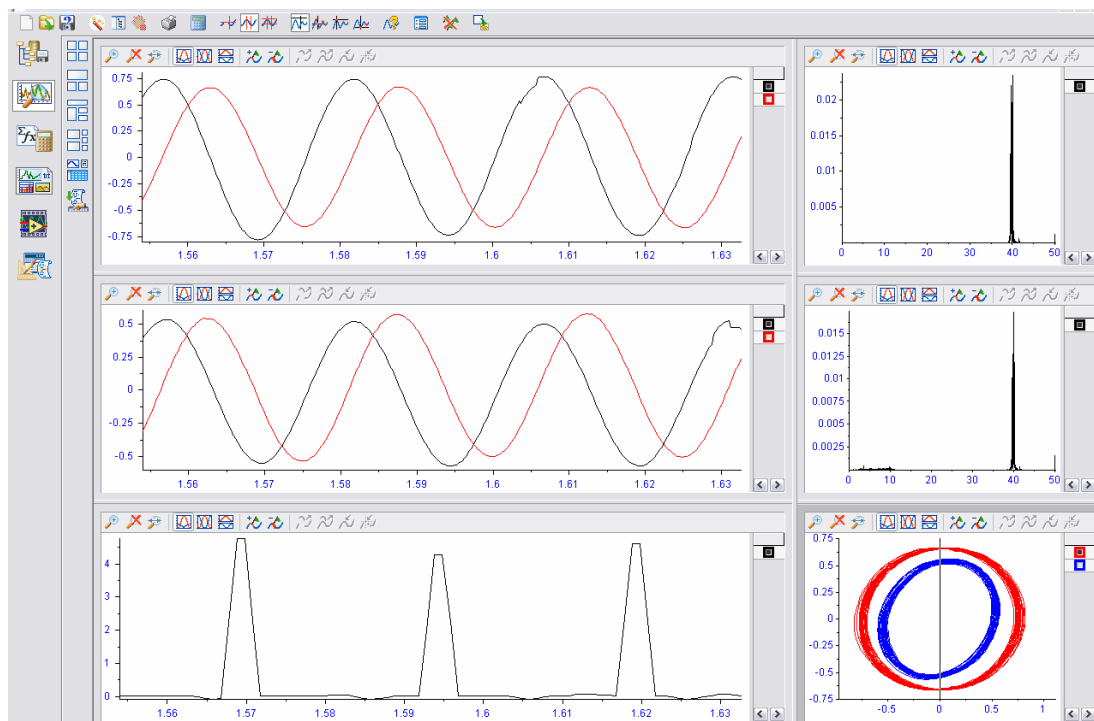


Bild 3.7: Programmoberfläche der entwickelten LabView-Diadem-Applikation

Das Bild 3.7 zeigt beispielhaft die Programmoberfläche für den Schwingweg des Modellrüttlers in den zwei Messebenen, die Position der Unwuchtmasse und die Onlineauswertung des Frequenzspektrums der Rüttlerschwingung mittels Fourier-Transformation.

Durch einen induktiven Näherungsschalter (Bild 3.8 / Schnitt 1-1) wird die Position der Unwuchtmasse ermittelt. Hierdurch ist die Bestimmung des Vorlaufwinkels möglich, der einen wesentlichen Parameter zur Bewertung von Resonanzzuständen darstellt.

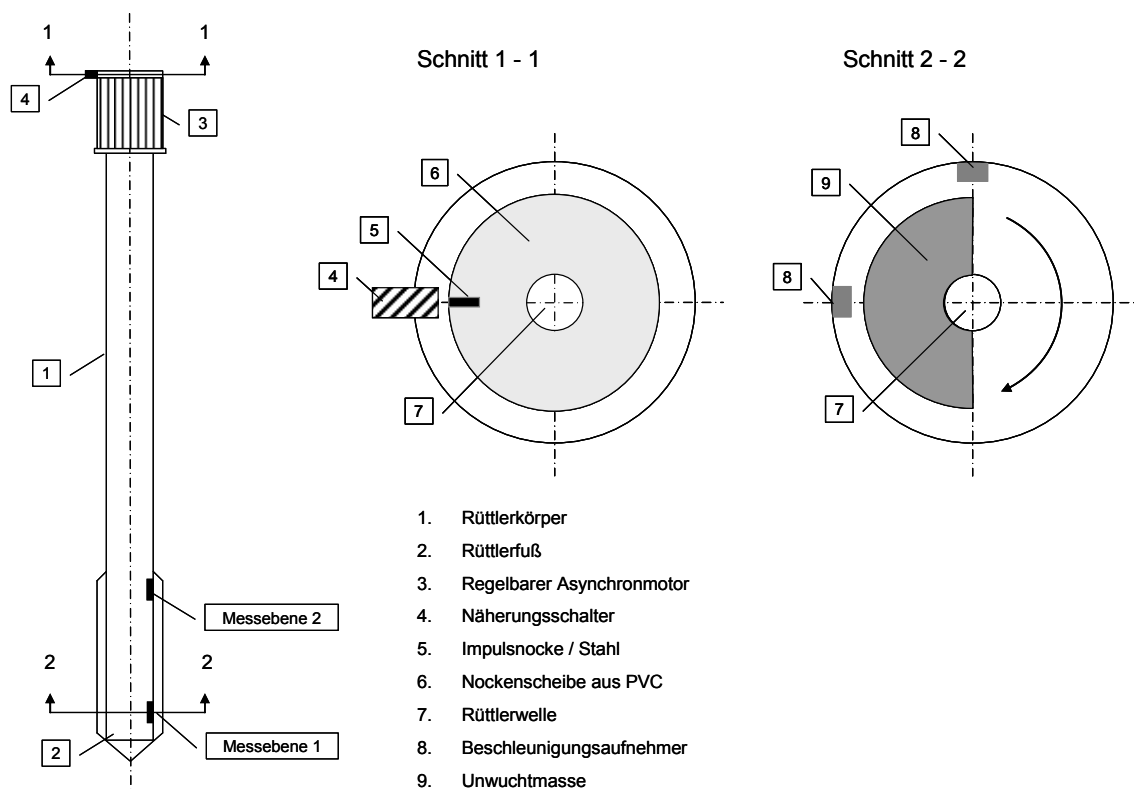


Bild 3.8: Messtechnik im Modelltiefenrüttler

Der Vorlaufwinkel beschreibt das Maß des Vorausschlagens der rotierenden Unwucht vor der Rüttlerbewegung. In Bild 3.9 ist das Prinzip der messtechnischen Erfassung des Vorlaufwinkels dargestellt. Der Näherungsschalter erzeugt ein Blocksignal, wenn sich der Schwerpunkt der Unwuchtmasse am Sensor vorbei bewegt. Die Rüttlerbewegung läuft der Unwuchttrotation nach. Deshalb ist das Maximum der sinusförmigen Rüttlerschwingung um den Betrag Δt zeitversetzt. Mit der beschriebenen Messtechnik kann der Vorlaufwinkel für jeden Betriebszustand des Rüttlers ermittelt werden. Liegt die Erregerfrequenz in einem gering gedämpften System deutlich über der Eigenfrequenz,

beträgt der Vorlaufwinkel ca. 180° (vgl. Kap. 2.4.2). Ist die Erregerfrequenz dagegen niedriger als die Systemeigenfrequenz, strebt der Vorlaufwinkel gegen Null. Rüttler und Unwuchtmasse schwingen in diesem Fall in Phase.

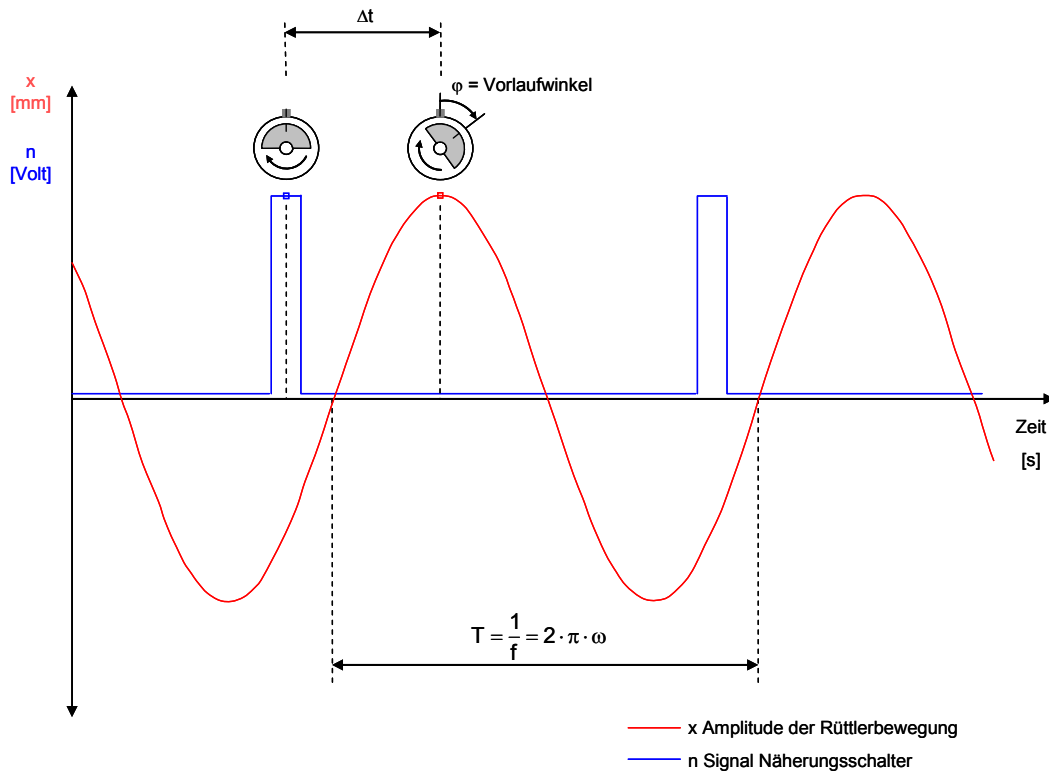


Bild 3.9: Prinzip der messtechnischen Erfassung des Vorlaufwinkels

Im Resonanzfall gilt für den Vorlaufwinkel:

$$\varphi = 90^\circ = \frac{\pi}{2} . \quad (3.5)$$

Über die Messtechnik im Modellrüttler hinaus sind am Versuchsschacht Beschleunigungsaufnehmer angebracht worden (vgl. Kapitel 3.3.1). Mit Hilfe dieser Messsignale kann die Veränderung der Schwingungsübertragung im Modellsand während des Verdichtungsvorganges bewertet werden.

Ein weiterer wesentlicher Mechanismus der Rütteldruckverdichtung in wassergesättigten Sanden ist die Bodenverflüssigung. Ein wichtiger Indikator hierfür ist die Veränderung der Porenwasserdrücke (vgl. Kapitel 2.4.1). Infolge der dynamischen Einwirkung des Tiefenrüttlers, steigt der Porenwasserdruck an und die effektiven Spannungen werden reduziert. Mit dem Verlust der Korn-zu-Korn-Spannungen weist der Boden kei-

ne Scherfestigkeit mehr auf, und es können große Verformungen auftreten. Für die Untersuchung der Bodenverflüssigung bei der Anwendung des Rütteldruckverfahrens wurden in der Versuchsanlage in zwei Messebenen Porenwasserdruckaufnehmer in einem Abstand von ca. 15 cm zum Modellrüttler eingebaut (Bild 3.10). Die untere Messebene ist jeweils in der Tiefe der Rüttlerunwucht positioniert worden und die obere Messebene in der Mitte der Rüttlerabsenktiefe.

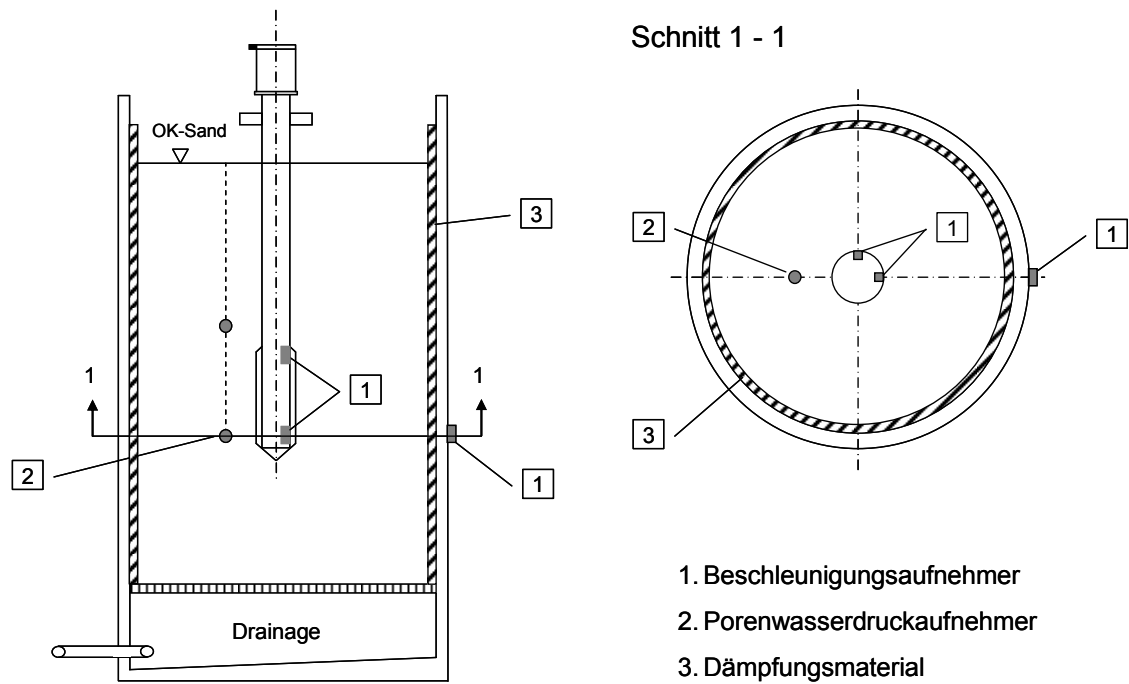


Bild 3.10: Eingesetzte Messtechnik am Modellversuchsstand

Der vollständige Aufbau des verwendeten Messsystems, der Signalverarbeitung und Datenerfassung ist in einer zusammenfassenden Übersicht in Bild 3.11 dargestellt.

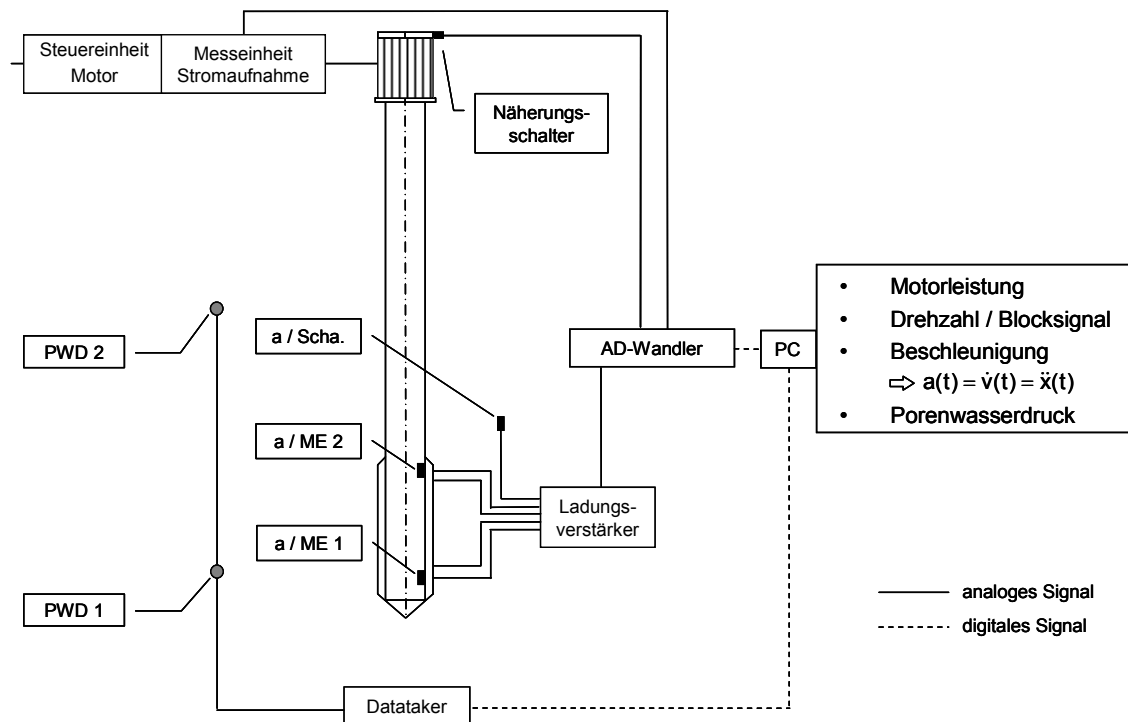


Bild 3.11: Schematische Darstellung des Systems der Messtechnik und Datenverarbeitung

3.4 Versuchsdurchführung

Es wurden zwei Hauptversuchsserien durchgeführt. In der 1. Serie ist die Rüttlerfrequenz zwischen 20 Hz und 45 Hz und die Unwuchtmasse zwischen 250 g und 1000 g variiert worden. Die Eintauchtiefe des Rüttlers in den Modellsand betrug bei diesen Versuchen 1,20 m. Hierdurch wurde ein vergleichbarer Überlagerungsdruck für alle Versuche gewährleistet. Absenkhilfen in der Form von Luft- oder Wasserspülung wurden nicht eingesetzt, um Einflüsse dieser Medien auf den Verdichtungsprozess auszuschließen. Zielsetzung der Versuchsserie 1 ist die Untersuchung der Einflüsse der Rüttlerfrequenz und der Unwuchtmasse auf die erzielte Verdichtung des Modellsandes und deren räumliche Ausbildung.

Bereits für den Absenkvorgang ist am Modellrüttler die Erregerfrequenz des jeweiligen Versuches eingestellt worden. Durch die Verwendung eines Asynchronmotors ist eine konstante Frequenz für alle Betriebszustände des Rüttlers gewährleistet. Rüttlerfliehkräfte unter 0,2 kN konnten nicht untersucht werden, da hier eine Absenkung des Rüttlers ohne Spülhilfen auf die gewünschte Tiefe von 1,20 m nicht möglich war.

Alle Versuche der Serie 1 wurden mit einer Verdichtungsdauer von 60 Minuten durchgeführt. Diese einheitliche Verdichtungsdauer wurde auf der Grundlage von Vorversuchen gewählt und gewährleistete für die untersuchten Frequenz-Unwucht-Kombinationen das Erreichen eines stationären Endzustandes. Die Ermittlung der Dichteänderung des Modellsandes erfolgte mittels Rammsondierungen (vgl. Kap. 3.5.2). Der Modellrüttler verblieb hierbei im Sand, um eine Beeinflussung der Lagerungsdichte durch den Ziehvorgang des Rüttlers auszuschließen.

SCHRAN (2003) und KIRSCH, SONDERMANN (2001) geben an, dass der Zeitraum zwischen der dynamischen Verdichtung und der Durchführung der Sondierung einen deutlichen Einfluss auf die ermittelte Dichte haben kann. Deshalb wurden im Rahmen der Modellversuche die Rammsondierungen einheitlich nach einer Wartezeit von 10 Minuten durchgeführt. Darüber hinaus erfolgten die Rammsondierungen in Bezug auf die Ansatzpunkte immer in der gleichen Reihenfolge.

Die untersuchten Variationen der Versuchsserie 1 sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Untersuchungsmatrix Versuchsserie 1

Unwucht [g] Frequenz [Hz]	250	500	750	1000
20	-	-	X	X
25	-	X	X	X
30	-	X	X	X
35	-	X	X	X
40	X	X	X	X
45	X	X	X	X

Der Schwerpunkt der Versuchsserie 2 liegt in der Untersuchung von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System und der Bodenverflüssigung während des Verdichtungs Vorganges. Es wurde zusätzlich zu der Rüttlerfrequenz und der Unwuchtmasse auch die Eintauchtiefe des Rüttlers zwischen 60 cm und 100 cm variiert. Auf dieser Grundlage kann der Einfluss des Überlagerungsdruckes auf den Verdichtungs Vorgang bewertet werden. In dieser Versuchsserie ist zudem der Porenwasserdruck im Modellsand in zwei Messebenen während der Verdichtung erfasst worden (vgl. Kap.

3.3.5). Die Verdichtungsdauer betrug hierbei einheitlich 15 Minuten. Anschließend wurde der Modellrüttler gezogen. Rammsondierungen wurden im Rahmen dieser Versuchsserie nicht durchgeführt. Die untersuchten Variationen der Versuchsserie 2 sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Tabelle 3.4: Untersuchungsmatrix Versuchsserie 2

Unwuchtmasse [g]	500			750		
Eintauchtiefe [cm]	60	80	100	60	80	100
Frequenz [Hz]						
25	X	X	X	X	X	X
35	X	X	X	X	X	X
45	X	X	X	X	X	X

Für die Dokumentation der Sandsetzung aller Verdichtungsversuche wurde eine Schablone angefertigt, die auf den Versuchsschacht aufgelegt wurde. Die Schablone besitzt jeweils vier definierte Bohrungen in den Radien von 20 cm und 40 cm zur Rüttlerachse (Bild 3.12). Diese geben die Ansatzpunkte für die Setzungsmessungen während des Verdichtungsversuches als auch für die Rammsondierungen nach der Verdichtung vor.

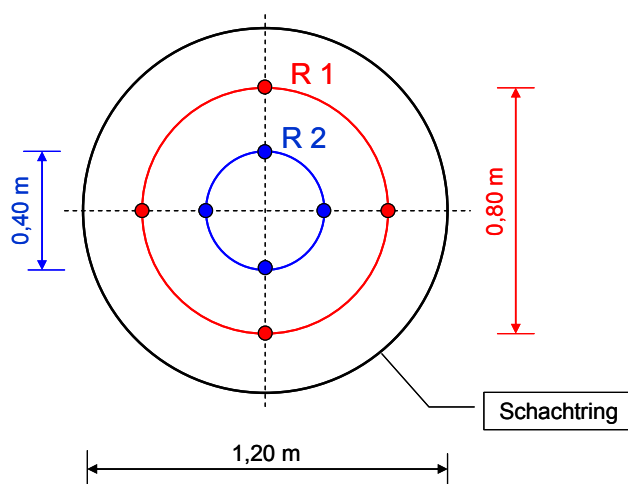


Bild 3.12: Messschablone für die Messung der Sandsetzung und Ansatzpunkte für die Rammsondierung

3.5 Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse

Im Folgenden wird die Auswertung der Verdichtungsversuche der Serie 1 und 2 vorgestellt. Am Beispiel eines charakteristischen Versuches (40 Hz, $m_u = 750\text{g}$) erfolgt zunächst die Darstellung der wesentlichen Messgrößen über die Verdichtungszeit bzw. in den einzelnen Versuchsphasen (Bild 3.13).

Bevor der Rüttler in den locker gelagerten Modellsand eintaucht, wird er zentrisch im Versuchsschacht ausgerichtet. Die jeweilige Sollfrequenz des Versuches wird eingestellt und der Rüttler schwingt zunächst in der Luft mit seiner größten Amplitude (Bild 3.13-b). Der Absenkvorgang des Modellrüttlers bis zu der Solltiefe von 1,20 m erfolgt mit der größtmöglichen Vertikalgeschwindigkeit der Krananlage. Die Absenkung des Rüttlers dauert im Mittel ca. 10 Sekunden. Bis zum Ende des Verdichtungsversuches bleibt die Rüttlertiefe konstant (Bild 3.13-a).

Grundsätzlich beginnt die dynamische Anregung des Sandes, sobald der Rüttler in den Sand eintaucht. Während des Absenkvorganges nimmt die Rüttleramplitude bereits ab. Der eigentliche Verdichtungsvorgang beginnt jedoch nach dem Erreichen der Solltiefe. Mit zunehmender Dichte des Modellsandes nimmt die Rüttleramplitude weiter ab, bis sie einen konstanten Wert erreicht hat ($x_{\text{konst.}}$), der sich bis zum Ende des Verdichtungsversuches nicht mehr signifikant ändert (Bild 3.13-b).

Der Verlauf der am Versuchsschacht gemessenen Beschleunigung stellt sich invers zur Rüttleramplitude dar (Bild 3.13-c). Das Signal steigt nach dem Eintauchen des Rüttlers zunächst leicht an. Nachdem der Rüttler die Solltiefe erreicht hat, steigen die übertragenen Schwingungen auf den Versuchsschacht mit zunehmender Dichte und Steifigkeit des Sandes an. Das Beschleunigungssignal erreicht ein lokales Maximum etwa zeitgleich mit dem Erreichen der konstanten Rüttleramplitude. Im weiteren Verlauf des Verdichtungsversuches steigt das Signal nur noch gering an. Eine weitere Auswertung hierzu erfolgt in den folgenden Kapiteln 3.5.2 und 3.5.3.

Bild 3.13-d zeigt die Entwicklung des Vorlaufwinkels während der Verdichtung. In der Luft schwingend ist die Eigenfrequenz des Rüttlers deutlich kleiner als die Erregerfrequenz von 40 Hz (vgl. Kap. 3.5.1). Der Vorlaufwinkel beträgt für diesen Fall ca. 180° . Während des Verdichtungsvorganges nimmt der Vorlaufwinkel ab, bis er ähnlich der Rüttleramplitude einem konstanten Endwert entgegenstrebt. Da die Rüttlerfrequenz

konstant bleibt, dokumentiert die Abnahme des Vorlaufwinkels einen Anstieg der Eigenfrequenz des Rüttler-Boden-Systems mit zunehmender Dichte des Sandes. Die weiterführende Auswertung hierzu folgt in Kapitel 3.5.7.

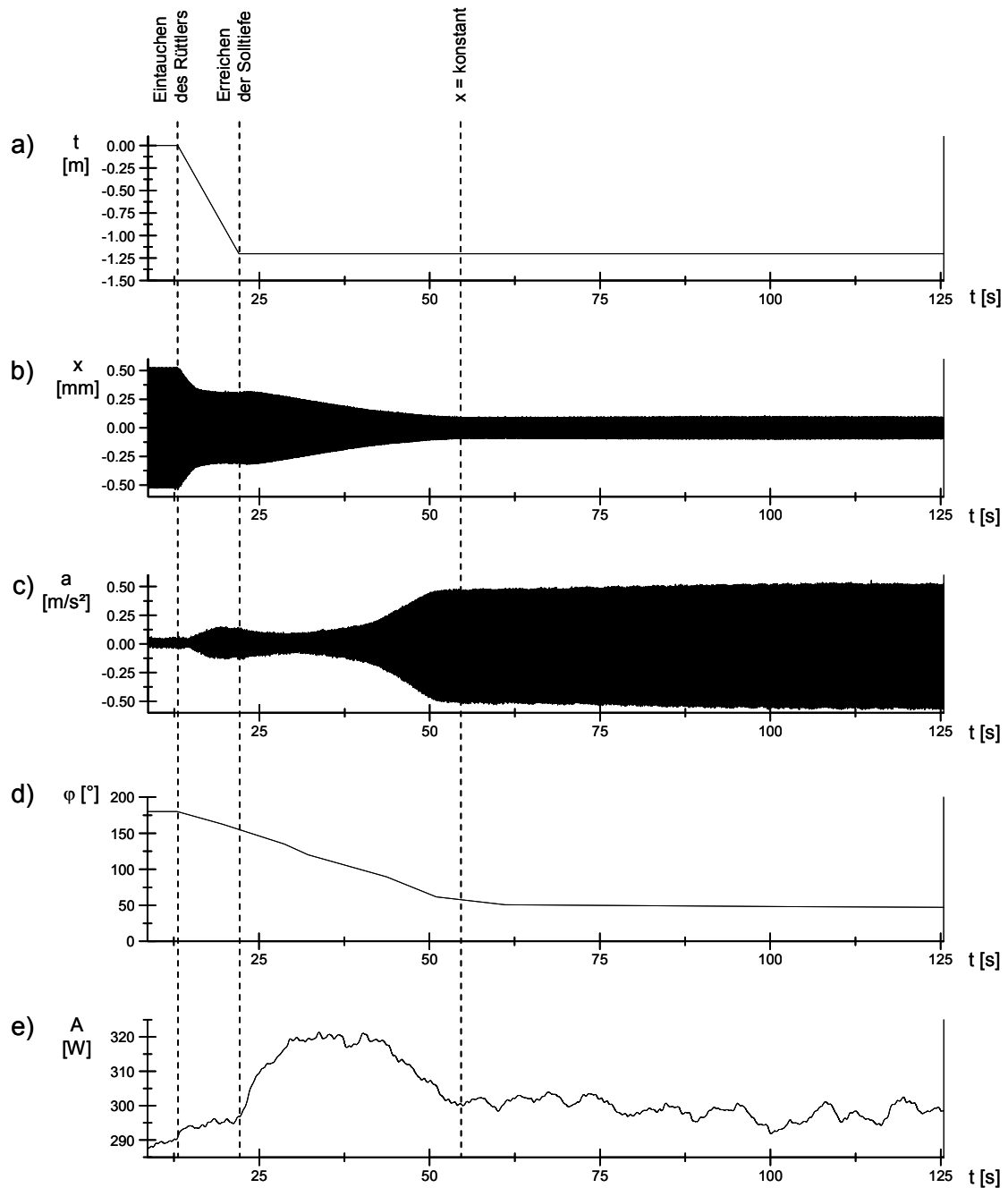


Bild 3.13: Charakteristische Messsignale eines Verdichtungsversuches, Bsp.: 40 Hz-750 g

- a) Eintauchtiefe des Modellrüttlers
- b) Rüttlerschwingung Messebene 1 / Rüttlerspitze
- c) Beschleunigungssignal am Versuchsschacht
- d) Vorlaufwinkel
- e) Motorleistung

Die Leistung des Rüttlermotors zeigt in dem Zeitintervall der größten Amplitudenabnahme des Rüttlers ein lokales Maximum (Bild 3.13-e). Die Bewertung eines Zusammenhanges zwischen der Leistung des Rüttlermotors und der erzielten Dichte des Bodens ist Kapitel 3.5.5 zu entnehmen.

3.5.1 Rüttlerbewegung

Für die Bewertung des Schwingverhaltens des Modellrüttlers wurde im ersten Schritt die Variation der Frequenz und der Unwuchtmasse für den Rüttler in der Luft ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die Amplitude des Rüttlers oberhalb von ca. 15 Hz jeweils für die einzelnen Unwuchtmassen als konstant anzusehen ist.

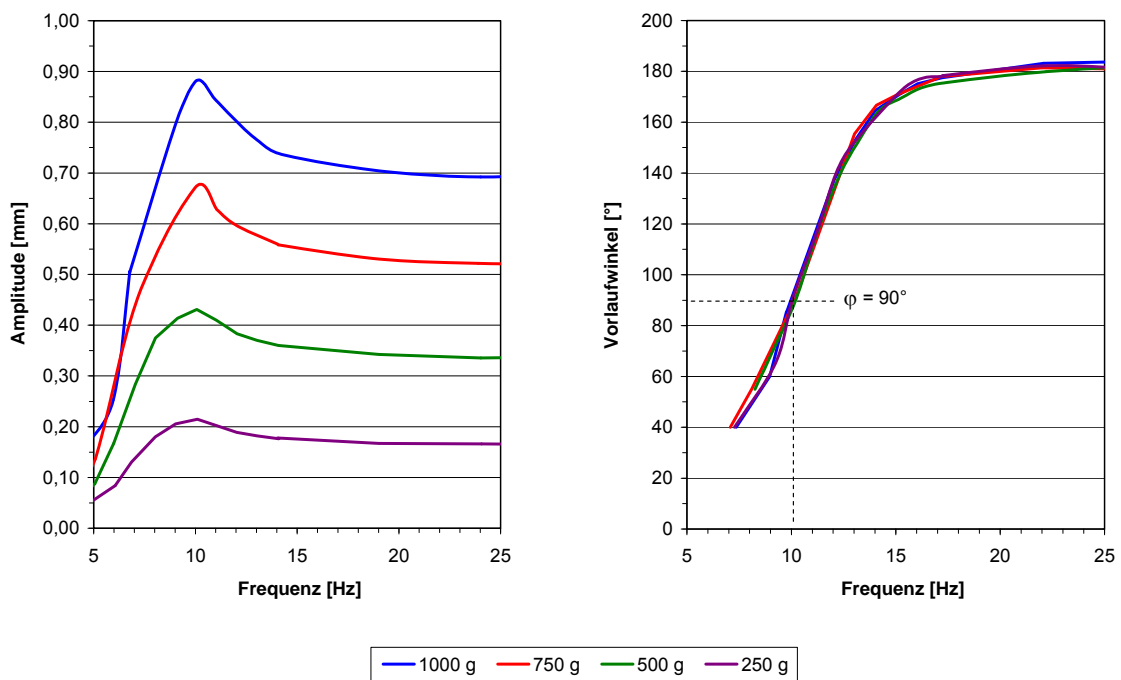


Bild 3.14: Amplitude der Bewegung an der Rüttlerspitze und Vorlaufwinkel in der Luft

Im Frequenzbereich zwischen 9 und 11 Hz kommt es bei jeder Unwuchtmasse zu einer Amplitudenüberhöhung. Die Eigenfrequenz des Rüttlers in der Luft kann somit bei ~ 10 Hz identifiziert werden. Die Auswertung des Vorlaufwinkels bestätigt für $\varphi = 90^\circ$ diese Frequenz (Bild 3.14). Die Korrelation der Eigenfrequenzbestimmung aus der Amplituden- und Vorlaufwinkelauswertung belegt die Eignung der verwendeten Messtechnik für die Bewertung von Systemresonanzen (vgl. Kapitel 2.3.1.3).

Schwingt der Rüttler im Boden, kommt es durch die dynamische Anregung des locker gelagerten Sandes zu plastischen Verformungen. Bei einer konstanten Frequenz bzw. Fliehkraft wie in den durchgeführten Versuchen nehmen die plastischen Verformungen so lange zu, bis sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der dynamischen Belastung und der aktivierbaren Bodenreaktionskraft einstellt. Das Erreichen des Gleichgewichtszustandes im Nahbereich des Rüttlers wird durch eine gleich bleibende Amplitude der Rüttlerschwingung deutlich. Die Größe dieser konstanten Amplitude wird wesentlich von der erzeugten Fliehkraft des Rüttlers beeinflusst. Dies gilt auch für die Verdichtungsdauer bis sich die konstante Amplitude eingestellt hat. Bild 3.15 zeigt diese Abhängigkeit exemplarisch für eine Unwuchtmasse von 1000 g bei unterschiedlichen Frequenzen.

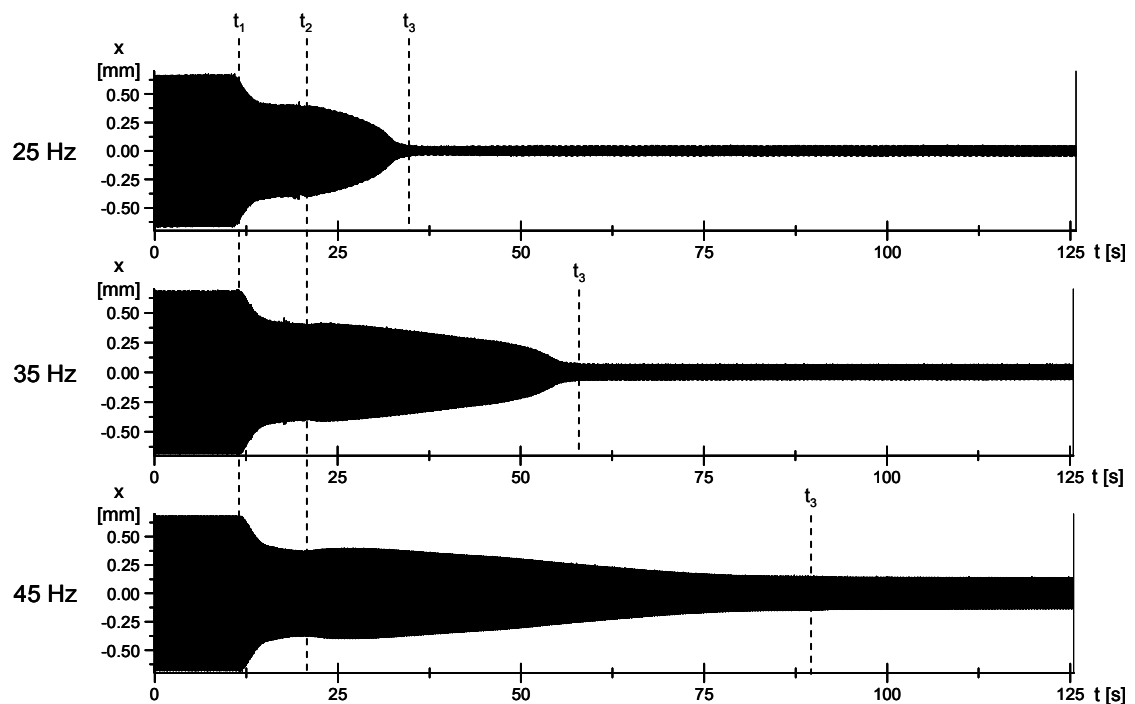


Bild 3.15: Änderung der Rüttleramplitude (ME 1) während des Verdichtungsvorganges im Boden (Tiefe: 1,20m, $m_u=1000\text{g}$)

mit: t_1 : Eintauchen des Modellrüttlers
 t_2 : Erreichen der Solltiefe
 t_3 : Erreichen der Amplitudenkonstanz

Die Auswertung der Wegsignale des Modellrüttlers mit der schnellen Fourier-Transformation (FFT) liefert das Frequenzspektrum des harmonisch erregten Rüttler-Boden-Systems. Es wird deutlich, dass die Schwingfrequenz des Systems im Boden

der eingestellten Frequenz des Modellrüttlers entspricht. Frequenzänderungen oder Überlagerungen mit einem n -fachen der Erregerfrequenz wurden nicht festgestellt. Die Ergebnisse der FFT für die exemplarischen Verdichtungsversuche mit einer Unwuchtmasse von 1000 g und Rüttlerfrequenzen von 25 Hz, 35 Hz und 45 Hz sind in Bild 3.16 dargestellt.

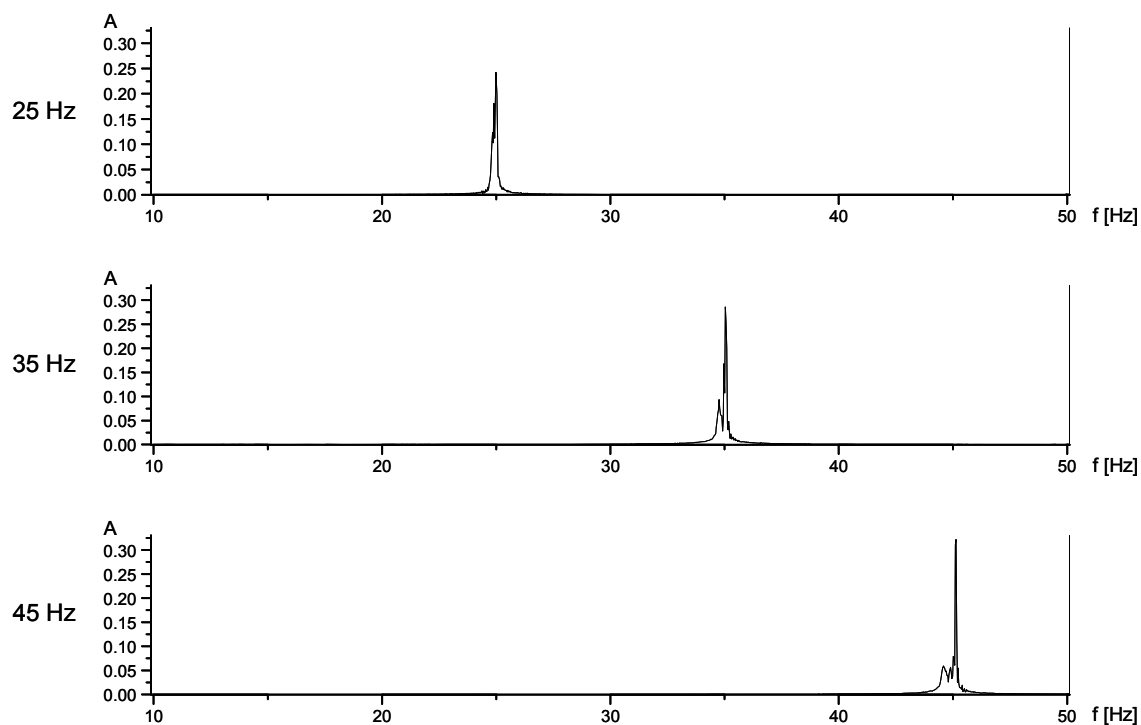


Bild 3.16: Frequenzanalyse (Fast-Fourier-Transformation, FFT) für die Rüttlerschwingung (ME 1) während des Verdichtungsvorganges (Tiefe: 1,20m, $m_u=1000\text{g}$)

Die Amplitude des Modellrüttlers im Boden ist im Bereich der Rüttlerspitze am größten und beschreibt eine Kreisform. Taumelbewegungen wurden nicht festgestellt. Die ermittelten Rüttleramplituden der Messebenen 1 und 2 in den jeweiligen x - und y -Messachsen dokumentieren eine kegelförmige Bewegung in der räumlichen Betrachtung. Die ebene und räumliche Bewegung des Modellrüttlers ist in Bild 3.17 dargestellt.

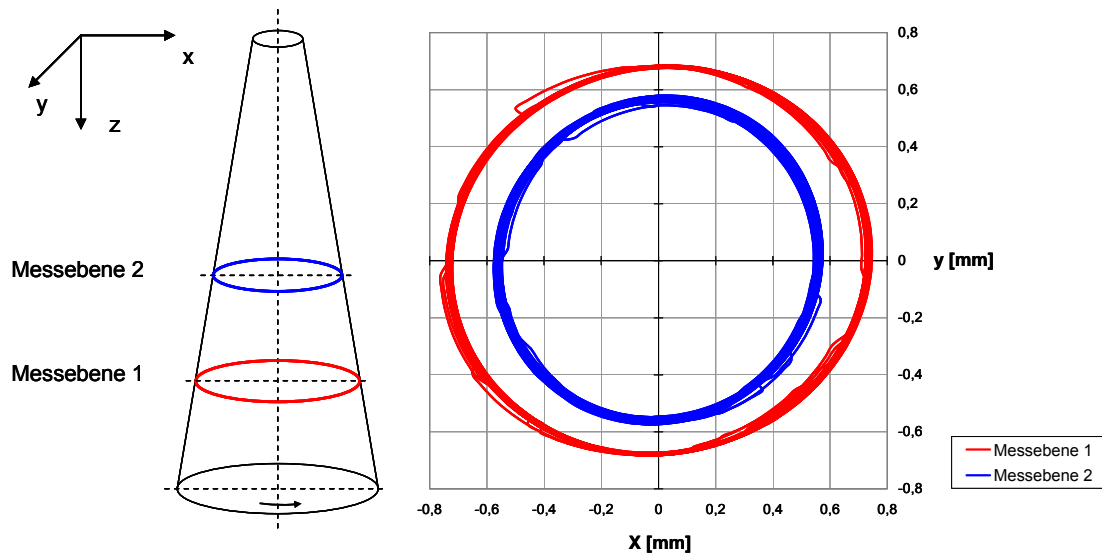


Bild 3.17: Schematische Darstellung der ebenen und räumlichen Rüttlerbewegung am Beispiel $m_u = 1000g$, $f = 35 \text{ Hz}$

Die Auswertung der Versuchsserie 1 zeigt die Abhängigkeit der Größe der stationären Rüttlerschwingung $x_{\text{konst.}}$ (vgl. Bild 3.15) von der einwirkenden Fliehkraft. Es wird deutlich, dass die Größe der stationären Amplitude näherungsweise linear von der Rüttlerfliehkraft abhängig ist. Dieses ist nicht davon beeinflusst, mit welcher Frequenz-Unwucht-Kombination die Fliehkraft erzeugt wird (Bild 3.18).

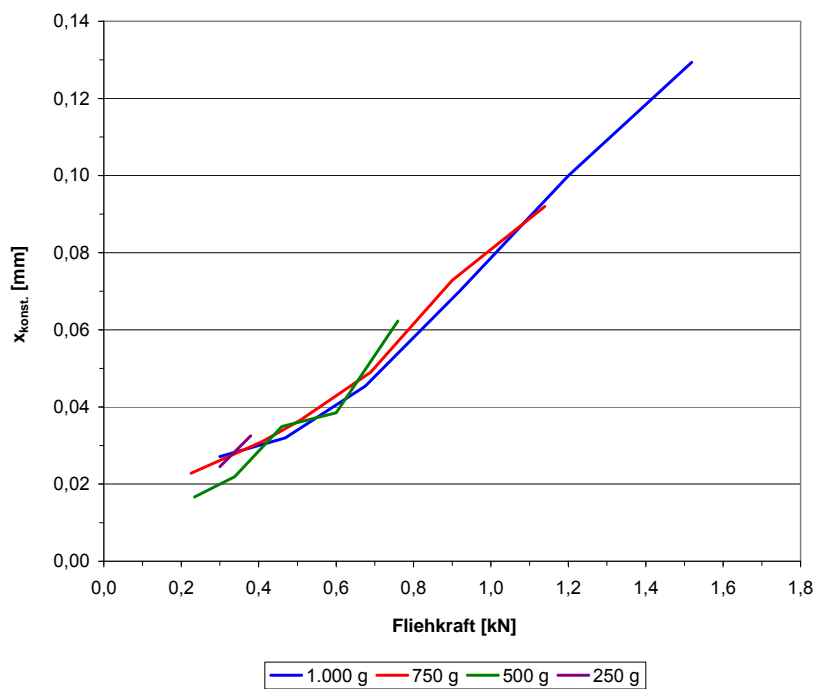


Bild 3.18: Stationäre Amplitude der Rüttlerschwingung der Messebene 1 im Boden für die Versuchsserie 1 in Abhängigkeit von der Fliehkraft, $t = 1,20 \text{ m}$

Die Verdichtungszeit, die bis zum Erreichen einer konstanten Amplitude erforderlich ist, wird allerdings nicht nur von der wirkenden Fliehkraft, sondern auch von der Rüttlerfrequenz bestimmt. Deshalb ist die Betrachtung der Rüttlerschwingung in Abhängigkeit von der Anzahl der einwirkenden Belastungszyklen im Rahmen der Ergebnisauswertung sinnvoll. Das Bild 3.19 zeigt exemplarisch die Amplitude der Rüttlerschwingung während eines Verdichtungsversuchs, in Abhängigkeit von den Belastungszyklen für eine Unwuchtmasse von 1000 g. Die Darstellung beginnt (d.h. 0 Zyklen) mit dem Eintauchen des Rüttlers in den Modellsand.

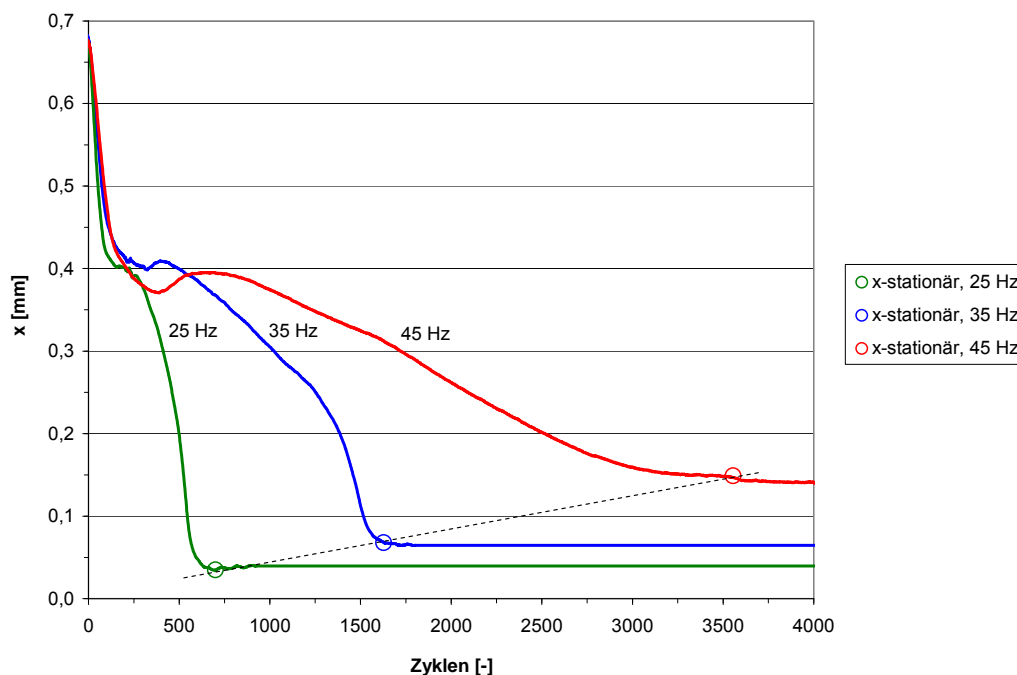


Bild 3.19: Amplitude der Rüttlerschwingung der Messebene 1 in Abhängigkeit von den Belastungszyklen, $m_u = 1000 \text{ g}$, $t = 1,20 \text{ m}$

Werden Verdichtungsversuche mit gleicher Fliehkraft betrachtet, so stellt sich bei einer kleinen Unwucht mit einer hohen Frequenz die konstante Amplitude schneller ein, als bei einer großen Unwucht mit einer niedrigen Frequenz. Es zeigt sich, dass die Anzahl der einwirkenden Belastungszyklen für die Einstellung eines rüttlernahen Gleichgewichtszustandes maßgeblich ist. Die Betrachtung der erforderlichen Anzahl der Belastungszyklen zum Erreichen einer konstanten Amplitude zeigt einen näherungsweise linearen Zusammenhang über die einwirkende Fliehkraft (Bild 3.20).

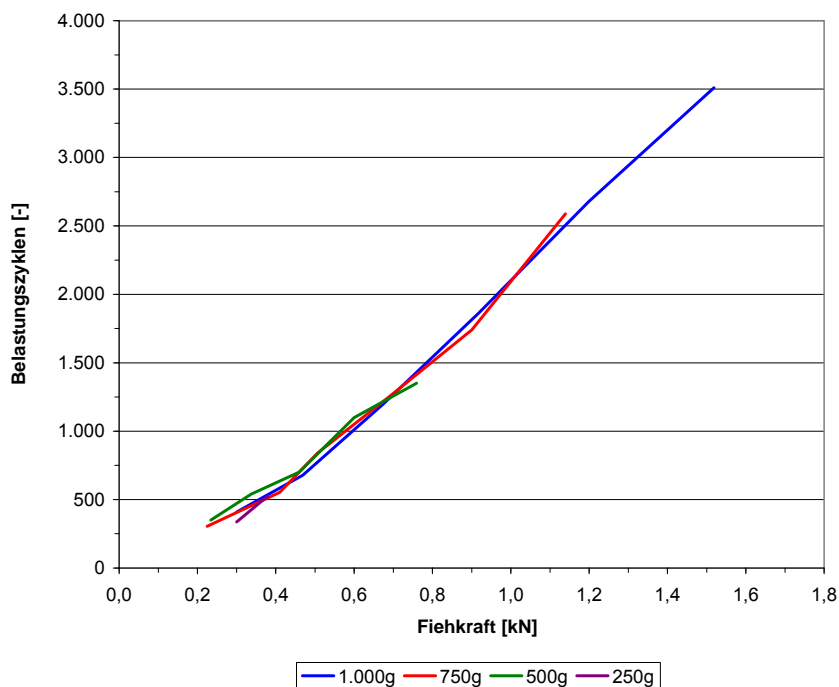


Bild 3.20: Anzahl der Belastungszyklen bis zum Erreichen einer konstanten Rüttleramplitude in Abhängigkeit von der Fliehkraft

In der Versuchsserie 2 ist über die Variation der Frequenz und der Unwuchtmasse hinaus auch die Absenktiefe des Modellrüttlers und somit der auf den Verdichtungsvorgang wirkende Spannungszustand variiert worden. Der Einfluss der Arbeitstiefe auf die Rüttleramplitude ist in Bild 3.21 dargestellt.

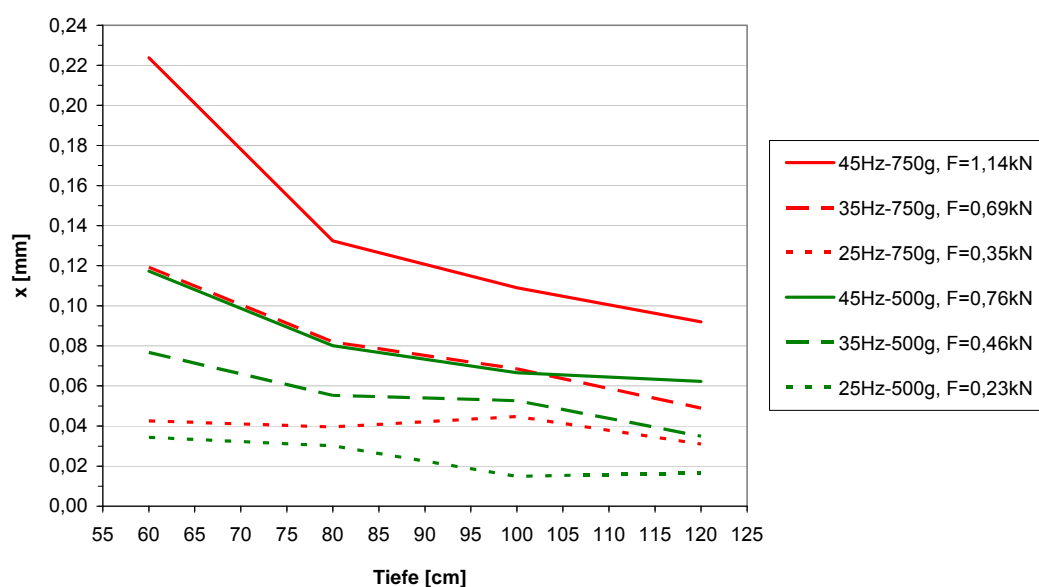


Bild 3.21: Abhängigkeit der stationären Amplitude des Modellrüttlers von der Eintauchtiefe

Es wird deutlich, dass die Amplitude mit abnehmender Überlagerung zunimmt. Dieser Zusammenhang ist umso ausgeprägter, je größer die wirkende Rüttlerfliehkraft ist. Bei geringen Fliehkraften ist die Rüttleramplitude annähernd unbeeinflusst von der Arbeitstiefe des Rüttlers. Die gemessenen Amplituden der Rüttlerbewegung streben mit zunehmender Überlagerung gegen einen Endwert. Auf der Grundlage der Messergebnisse kann angenommen werden, dass bei großen Überlagerungsspannungen die Rüttleramplitude von der Arbeitstiefe weitestgehend unbeeinflusst ist.

3.5.2 Erzielte Verdichtung

Die Änderung der Lagerungsdichte nach den Verdichtungsversuchen wurde durch Rammsondierungen in einem Radius von 20 und 40 cm zum Modellrüttler ermittelt. Mit der Anforderung der Vergleichbarkeit der Sondierergebnisse ist es notwendig, alle Sondierungen mit dem gleichen Fallgewicht und der gleichen Fallhöhe durchzuführen. Da bei den Versuchen mit einer geringen Rüttlerfliehkraft die Lagerungsdichte auch nach der Verdichtung noch gering war, konnte keine Standardrammsonde (DPL) eingesetzt werden. Deshalb wurde am IGB-TUBS ein Sonderfallgewicht mit einer Masse von 2 kg und einer Fallhöhe von 30 cm hergestellt und für die Sondierungen nach dem Verdichtungsverfahren mit dem Modellrüttler verwendet.

Für dieses Sonderfallgewicht gibt es keine genormte Auswertung bzw. Umrechnung von der Schlagzahl je 10 cm Eindringung (N10) in eine Lagerungsdichte. Auf der Grundlage einer statistischen Auswertung der durchgeführten Sondierungen wurde für den wassergesättigten Modellsand im Versuchsschacht eine Kalibrierung für den Zusammenhang zwischen der Schlagzahl und der Trocken- bzw. Lagerungsdichte ermittelt (Bild 3.22).

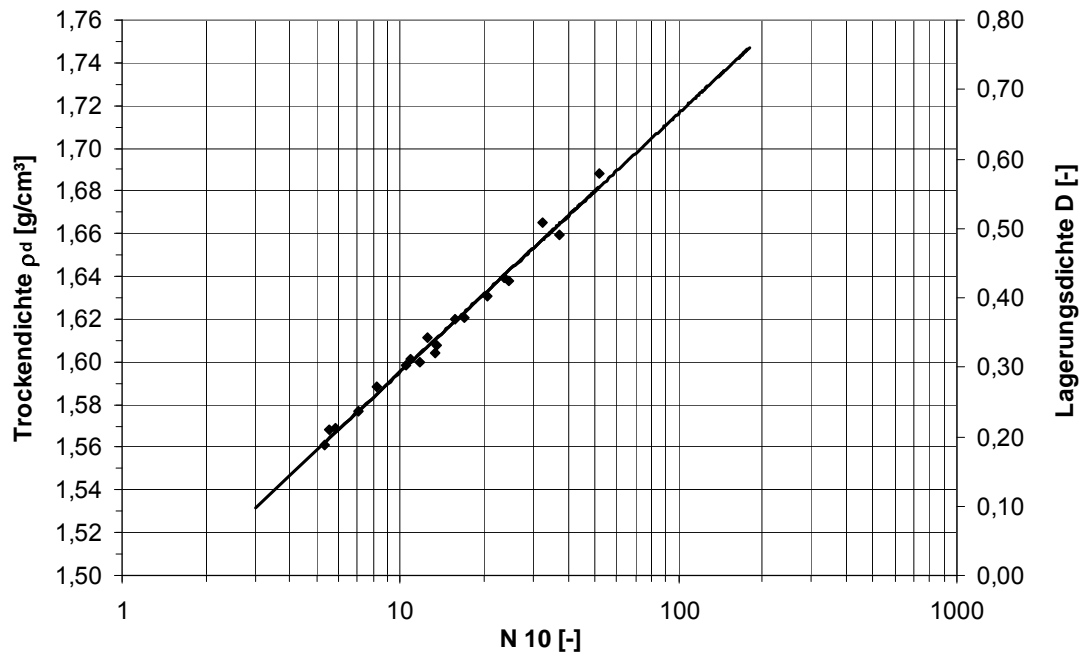


Bild 3.22: Zusammenhang zwischen N10, der Trocken- und Lagerungsdichte für das Sonderfallgewicht 2 kg

Die Kalibrierfunktion hieraus lautet:

$$\rho_d = 0,0526 \cdot \ln(N10) + 1,474 \quad (3.6)$$

Die Ergebnisse der Rammsondierungen können anschaulich durch Linien gleicher Lagerungsdichte in einem rotationssymmetrischen Schnitt des Versuchsschachtes dargestellt werden. Grundlage hierfür bildet die Mittelwertbildung der jeweils vier Sondierungen der zwei Untersuchungsradien. Der Variationskoeffizient der Sondierergebnisse der gemittelten Untersuchungsradien (vgl. Bild 3.12) beträgt i. M. $\sim 7\%$.

Die größte Lagerungsdichte im Modellsand wird im Bereich der Rüttlerspitze erzeugt. Mit zunehmendem Abstand zu diesem Bereich nimmt die Lagerungsdichte ab. Eine exemplarische Auswahl von Dichteverteilungen im Versuchsschacht zeigt Bild 3.23.

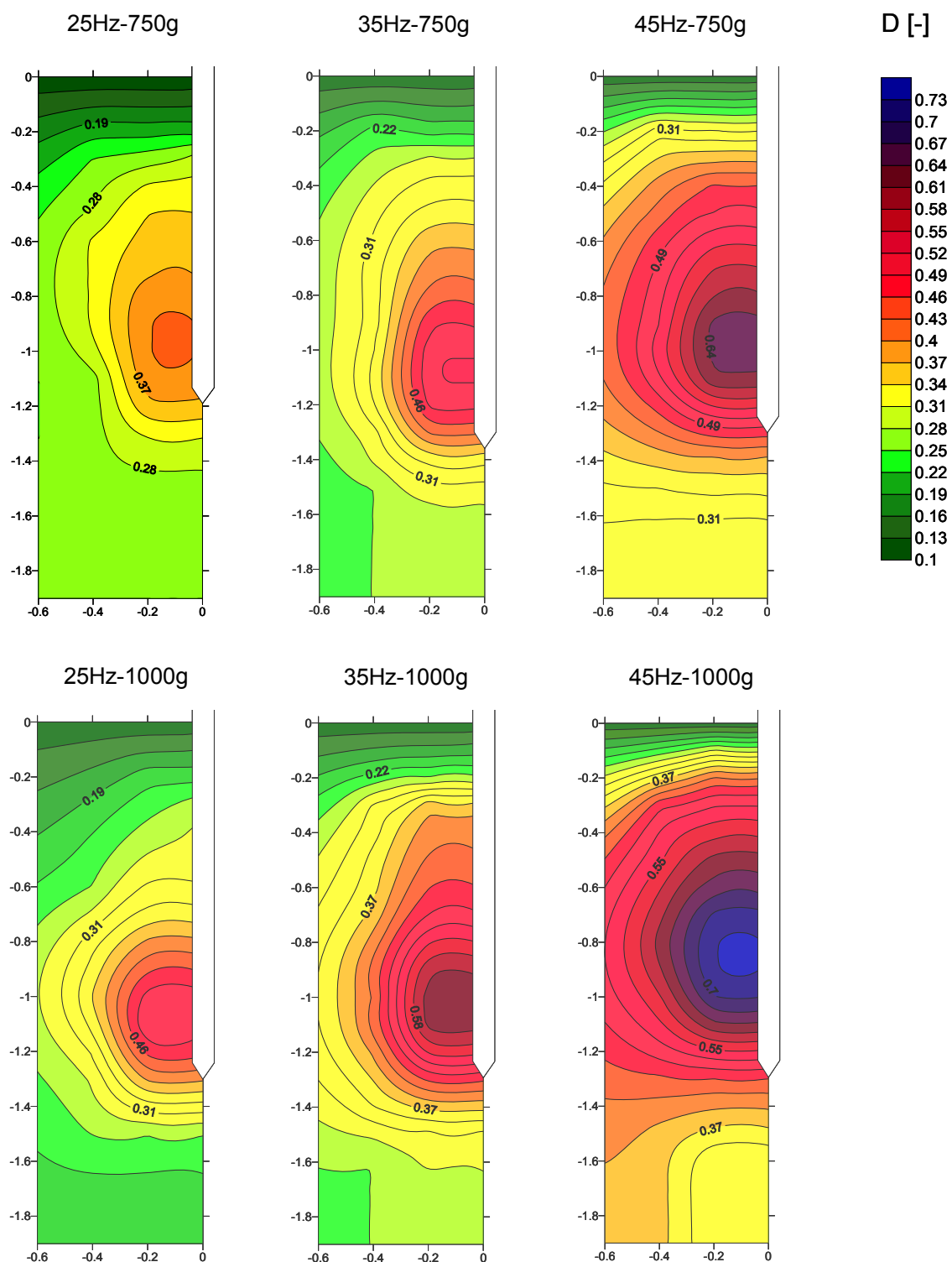


Bild 3.23: Verteilung der Lagerungsdichte im Versuchsschacht für die Versuchsserie 1 nach einer Rütteldauer von 60 Minuten

In Bezug auf die Variation von Unwuchtmasse und Frequenz ist erkennbar, dass mit zunehmender Rüttlerfliehkraft grundsätzlich auch eine höhere Lagerungsdichte erzielt wird. Dies zeigt die Auswertung der maximalen Dichte im Nahbereich des Rüttlers in Bild 3.24. Da die Rüttleramplitude im Boden linear mit der Fliehkraft ansteigt (vgl. Bild 3.18) nimmt auch die erzielbare Dichte mit der Steigerung der Rüttleramplitude zu. Es ist ferner zu erkennen, dass bei gleicher Fliehkraft mit einer größeren Unwucht eine höhere Dichte als mit einer kleineren Unwucht erreicht wird. Demnach weist die größere Unwucht mit einer niedrigen Frequenz bei gleicher Fliehkraft im Nahbereich eine höhere Verdichtungswirkung auf.

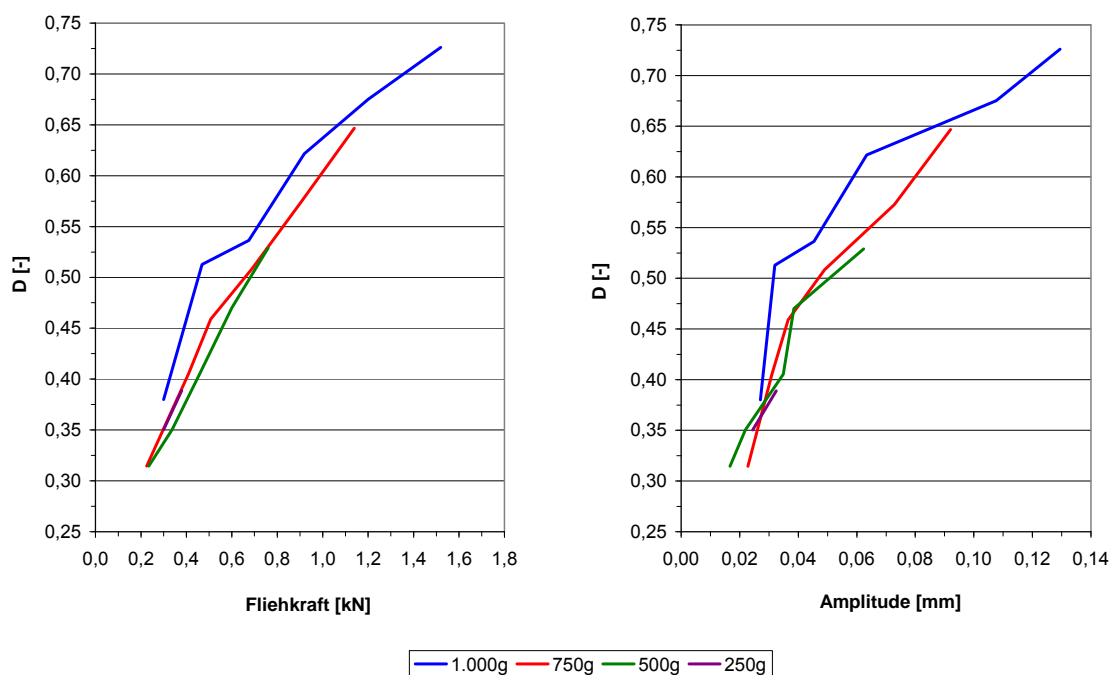


Bild 3.24: Auswertung der maximalen Dichte im Nahbereich des Rüttlers in Abhängigkeit von der Fliehkraft, Rüttleramplitude (ME 1) und Unwuchtmasse

Die Auswertung der Rüttleramplitude und der Schwingungsübertragung auf den Versuchsschacht zeigt, dass in der Versuchsserie 1 nach 10 bis 80 Sekunden Verdichtungszeit die Rüttleramplitude nicht weiter abnimmt bzw. die auf den Versuchsschacht übertragenen Schwingungen nicht mehr signifikant zunehmen. Unter der Annahme, dass nach dem Erreichen der Amplitudenkonstanz die Lagerungsdichte im Nahbereich des Rüttlers nicht mehr zunimmt, kann ein Zusammenhang zwischen der erforderlichen Verdichtungszeit und der ermittelten Lagerungsdichte hergestellt werden. Dies wird am folgenden Beispiel erläutert:

Die Rüttlerfliehkraft von $F = 0,30 \text{ kN}$ wird sowohl mit einer Frequenz von 40 Hz und einer Unwuchtmasse von 250 g, als auch mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Unwuchtmasse von 1000 g erzeugt. Die Amplitudenkonstanz stellt sich einmal nach 7 und einmal nach 14 Sekunden ein. In beiden Fällen wird der Boden in dem betreffenden Zeitintervall mit 280 Rüttlerzyklen belastet (Bild 3.25).

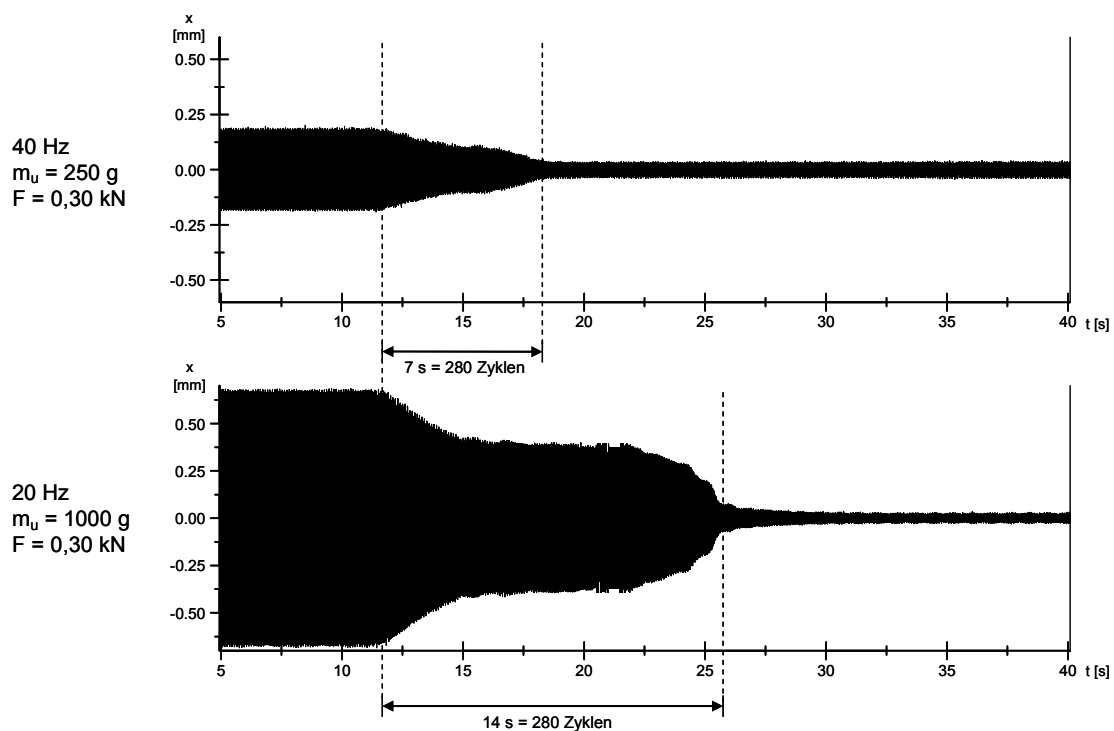


Bild 3.25: Vergleich der Rüttleramplitude (ME 1) während des Verdichtungsvorganges für 40Hz/250g und 20Hz/1000g

Es wird deutlich, dass bei der Verwendung der 1000 g - Unwuchtmasse der Rüttler mit einer deutlich größeren Amplitude schwingt. Der Verdichtungsvorgang dauert hierbei bis zur Amplitudenkonstanz länger, führt aber durch die größere Amplitude zu einer höheren Lagerungsdichte des Modellsandes. Dieser grundsätzliche Zusammenhang stellt sich für alle untersuchten Fliehkraft-Unwucht-Kombinationen ein und ist umso ausgeprägter, je größer die Fliehkraft und die Rüttleramplitude sind.

Dieser Vorgang wird differenzierter abgebildet, wenn die vom Modellrüttler geleistete Arbeit W auf die erforderliche Verdichtungszeit bezogen wird. Dies wird als mechanische Leistung P bezeichnet und ist wie folgt definiert:

$$P = \frac{F \cdot X}{t} = \frac{W}{t} \quad [\text{Nm/s}] . \quad (3.7)$$

Es gilt:

F:	Rüttlerfliehkraft	[N]
X:	Summe des Rüttlerschwingweges in der Verdichtungszeit	[m]
t:	Verdichtungszeit	[s]

Der Vergleich der Frequenz-Unwucht-Kombinationen 40 Hz / 250 g und 20 Hz / 1000 g ist in Tabelle 3.5 zusammengefasst. Bei einer gleichen Anzahl von Belastungszyklen bis zur Amplitudenkonstanz ist die Summe des Rüttlerschwingweges mit einer 1000 g-Unwucht während des Verdichtungszeitraumes deutlich größer als mit der 250 g-Unwucht. Obwohl die Verdichtungsdauer mit der 1000 g-Unwucht doppelt so lange dauert, ist die erbrachte Leistung größer.

Tabelle 3.5: Vergleich der Verdichtungsversuche 20 Hz / 1000 g und 40 Hz / 250 g

Frequenz	Unwucht	Fliehkraft	Verdichtung		Lagerungsdichte		Σ Schwingweg	Leistung
f [Hz]	m _u [g]	F [kN]	Zeit [s]	Zyklen [-]	max. N10 [-]	D [-]	X [m]	P [W]
20	1000	0,30	14	280	19	0,38	0,43	9,34
40	250	0,30	7	280	16	0,35	0,12	4,64

Die während eines Verdichtungsversuches erbrachte mechanische Arbeit und Leistung in Bezug auf die erzielte Lagerungsdichte zeigt Bild 3.26. Die mechanische Arbeit steigt mit der Zunahme der Lagerungsdichte exponential an. Dies bedeutet, dass ein Boden mit einer geringen Lagerungsdichte mit weniger Arbeit in einen Zustand höherer Lagerungsdichte versetzt werden kann, als ein Boden der bereits eine hohe Ausgangslagerungsdichte besitzt. Der Verlauf der erbrachten Rüttlerarbeit strebt asymptotisch einem Grenzwert entgegen. Die Lagerungsdichte kann bei einer weiteren dynamischen Verdichtung im grenzwertnahen Bereich nicht mehr gesteigert werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass mit dem Erreichen der kritischen Lagerungsdichte der Boden wieder aufgelockert wird. Mit der zur Verfügung stehenden Fliehkraft des Modellrüttlers konnte dieser Grenzbereich der Verdichtungsarbeit nicht erreicht werden. Wird im Rahmen der Leistungsermittlung die mechanische Arbeit auf die ermittelte Verdichtungszeit bezogen, wird ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen der Leistung des Modellrüttlers und der erzielten Lagerungsdichte im betrachteten Wertebereich festgestellt.

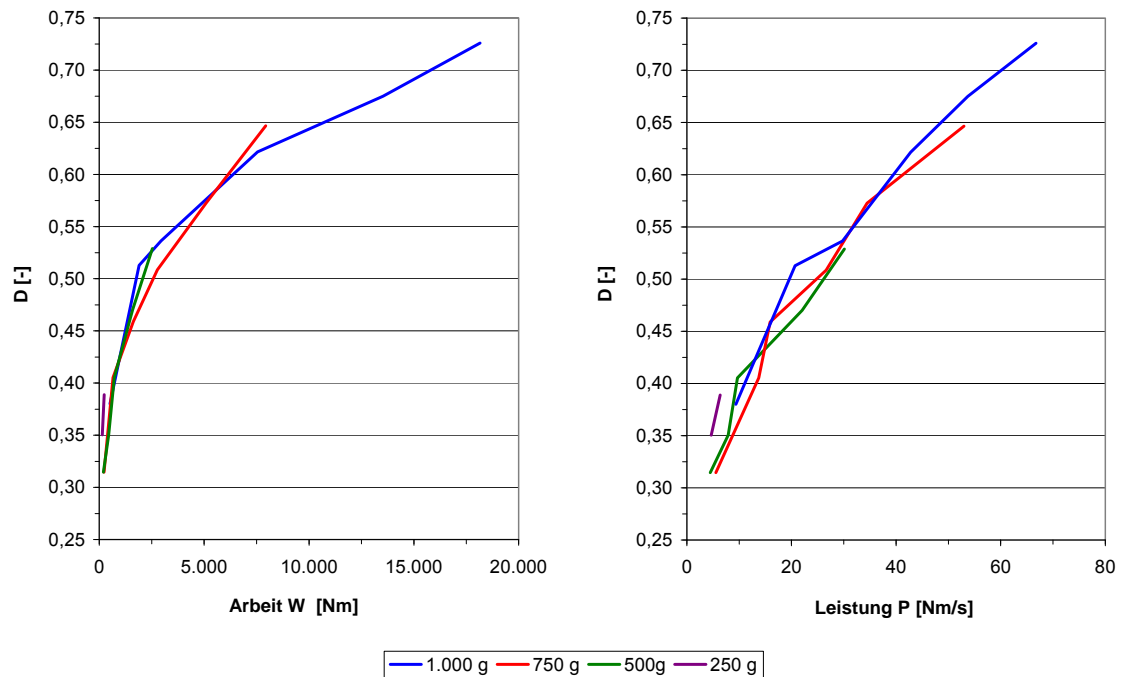


Bild 3.26: Mechanische Arbeit und Leistung des Modellrüttlers in Abhängigkeit von der erzielten Lagerungsdichte und der Unwuchtmasse

3.5.3 Verdichtungsreichweite

Durch die Auswertung der Dichteverteilung im Versuchsschacht (vgl. Bild 3.23), kann die Lagerungsdichte mit zunehmendem Abstand zum Rüttler ermittelt werden. Dies wurde für alle Verdichtungsversuche der Serie 1 durchgeführt. Die erzielte Lagerungsdichte nimmt erwartungsgemäß mit zunehmendem Abstand zum Rüttler ab. Wie bereits vorangehend erläutert, wird im Nahbereich des Rüttlers bei gleicher Fliehkraft mit einer größeren Unwucht und somit größeren Amplitude eine höhere Lagerungsdichte erzielt. Für die unterschiedlichen Frequenz-Unwucht-Kombinationen stellt sich die Dichteabnahme mit der Rüttlerentfernung unterschiedlich dar.

Bei den Verdichtungsversuchen mit einer Fliehkraft von 0,30 kN wird nach der Verdichtung im Randbereich des Schachtes eine Lagerungsdichte in der Größenordnung der Ausgangslagerungsdichte ermittelt. Deshalb eignen sich diese Versuche besonders für die Bewertung der Verdichtungsreichweite. Es wird deutlich, dass bei großen Unwuchtmassen mit einer niedrigen Rüttlerfrequenz die erreichte Lagerungsdichte im Nahbereich zwar höher, dafür aber die Verdichtungsreichweite geringer ist, als mit der kleinen Unwuchtmasse und hoher Rüttlerfrequenz (Bild 3.27).

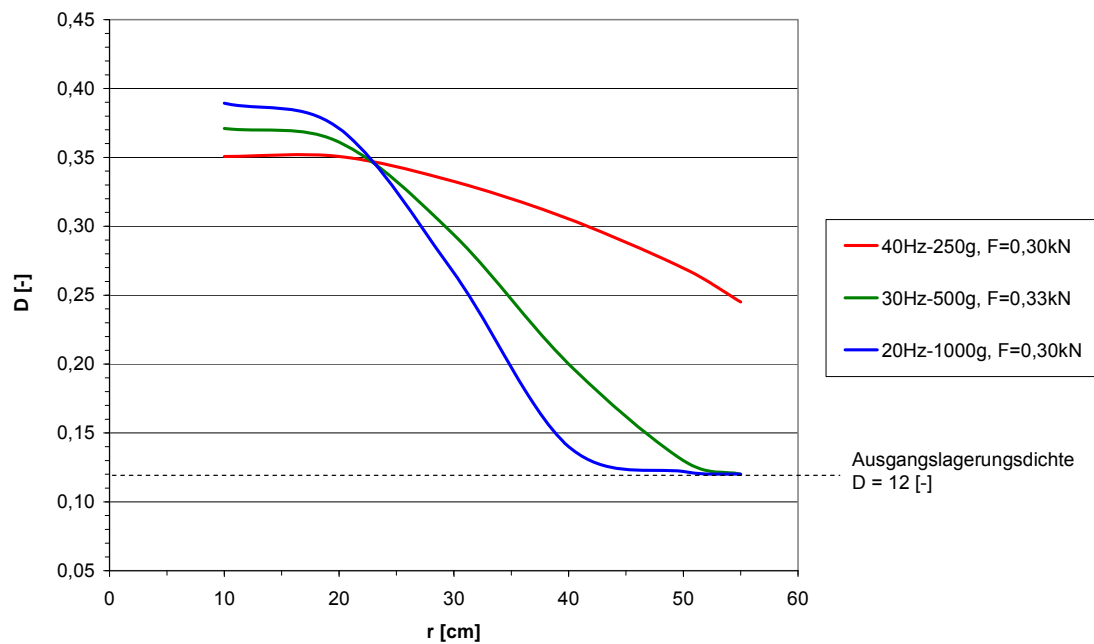


Bild 3.27: Erzielte Lagerungsdichte in Abhängigkeit vom Abstand zum Rüttler für eine Fliehkraft von $F = 0,30$ bzw. $0,33$ kN

Ein möglicher Erklärungsansatz für den ermittelten Zusammenhang besteht darin, dass durch die deutlich höhere Frequenz der fliehkraftgleichen dynamischen Anregung mit einer kleinen Unwuchtmass in einem größeren Bereich des Sandes eine Bodenverflüssigung erzielt wird. Diese bewirkt eine Verdichtungswirkung mit einer größeren Reichweite. Die Verflüssigung des Modellsandes während der Verdichtungsversuche wird auf der Grundlage der Porenwasserdruckmessungen in Kapitel 3.5.6 beschrieben.

3.5.4 Setzungsmessungen

Die Messung der Setzung der Sandoberfläche wurde während der Verdichtungsversuche mit Peilstangen und einem ortsfesten Nivelliergerät durchgeführt. Die Darstellung der Zeit-Setzungslinien zeigt, dass sich in einem Großteil der Versuche bereits nach wenigen Minuten 70-80 % der jeweiligen Endsetzungen eingestellt hat (Bild 3.28). Die Setzungsmessungen dokumentieren darüber hinaus eine fortschreitende Volumenabnahme des Sandes, nachdem die Rüttleramplitude bereits ihren konstanten Endwert erreicht hat. Gemäß Kapitel 3.5.1 / Bild 3.20 wird eine stationäre Amplitude der Rüttlerbewegung nach einer Verdichtungsdauer von 10 bis 80 Sekunden erreicht. Auf dieser Grundlage kann angenommen werden, dass im Nahbereich des Rüttlers mit der Kon-

stanz der Rüttleramplitude die für die betreffende Frequenz-Unwucht-Kombination erzielbare Lagerungsdichte erreicht ist. Mit dem räumlich fortschreitenden Steifigkeitszuwachs des Bodens können mehr Schwingungen auf den Sand übertragen werden und mit zunehmender Entfernung zum Rüttler eine Verdichtungswirkung erzielen. Mittels Messung und Auswertung der Rüttleramplitude allein kann also nur eine Aussage über den Verdichtungszustand des Bodens gemacht werden, der den Rüttler unmittelbar umgibt.

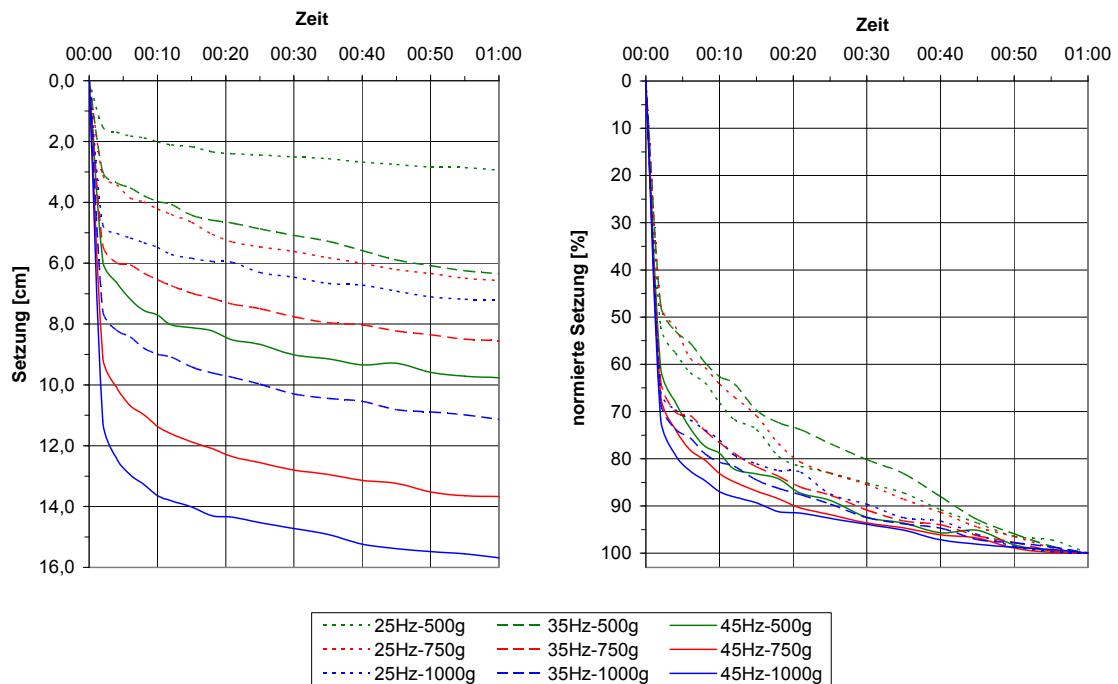


Bild 3.28: Zeit-Setzungslinie der Sandoberfläche

Eine Bewertung der geometrischen Form und Größe des Bereichs, der als Nahbereich bezeichnet wird und das Schwingverhalten des Rüttlers unmittelbar beeinflusst, kann auf der Grundlage der durchgeführten Versuche nicht erfolgen. Hierfür könnten, im Rahmen von weiterführenden Untersuchungen, Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt werden, die in unterschiedlichen Abständen zum Rüttler unmittelbar im Modellsand positioniert sind. Auf Grund des Sandeinbaus mittels Einspülenverfahren konnten in dem Versuchstand keine Beschleunigungsaufnehmer definiert in den Sand eingebaut und zudem sichergestellt werden, dass diese auch das tatsächliche Schwingverhalten des Sandes erfassen. Grundsätzlich zeigt die Setzung der Sandoberfläche analog zur Rüttleramplitude eine annähernd lineare Abhängigkeit von der Rüttlerfliehkraft (Bild 3.29).

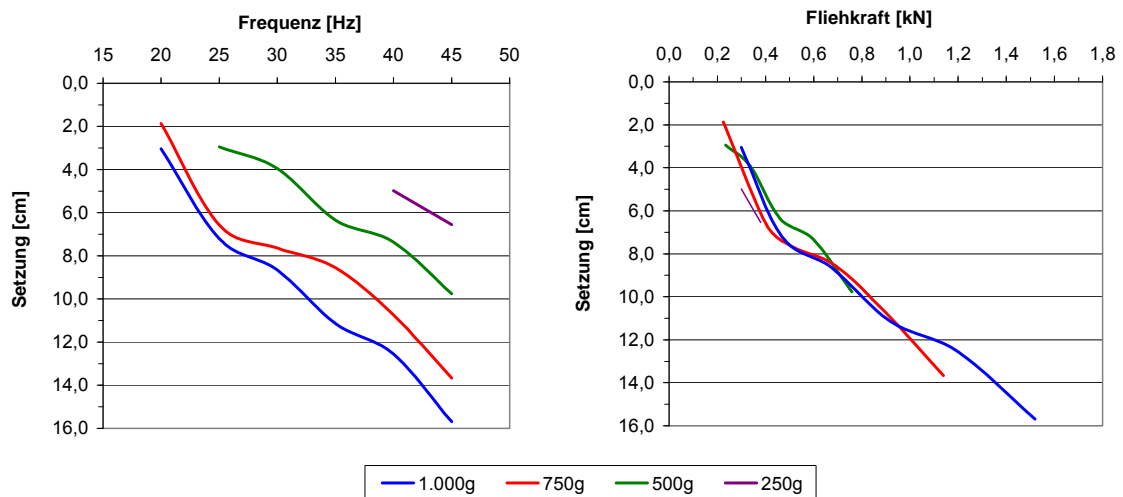


Bild 3.29: Setzung der Sandoberfläche in Abhängigkeit von der Rüttelfrequenz und Fliehkraft

3.5.5 Motorleistung

Für die durchgeführten Verdichtungsversuche wurde als Antriebsquelle für den Modellrüttler ein elektrischer Asynchronmotor eingesetzt. Dieser zeichnet sich u.a. dadurch aus, dass eine vorgegebene Rotationsfrequenz jederzeit konstant gehalten wird. Die unterschiedlichen Lastzustände des Motors während des Betriebes können durch die gemessene Stromaufnahme bewertet werden. In der Ausführungspraxis der Rütteldruckverdichtung wird i.d.R. die Betriebsleistung des Rüttlermotors im Rahmen der Qualitätssicherung erfasst und vielfach als ein Kriterium für die Festlegung der Ziehgeschwindigkeit des Rüttlers während der Verdichtung berücksichtigt. Es wird angenommen, dass eine hohe Leistungsaufnahme des Rüttlermotors eine hohe Lagerungsdichte des anstehenden Bodens dokumentiert.

Die Auswertung der erfassten Motorleistung zeigt im Vergleich der einzelnen Versuche einen sehr uneinheitlichen Verlauf während des Verdichtungsvorganges. Allen Auswertungen ist jedoch gemein, dass sich im Zeitintervall der größten Amplitudenabnahme der Rüttlerschwingung und somit der größten Dichtezunahme des anstehenden Bodens, ein lokales Maximum einstellt. Die Auswertung der lokalen Maxima ist in Abhängigkeit von der Rüttlerfrequenz, -fliehkraft und der erzielten Lagerungsdichte in Bild 3.30 dargestellt.

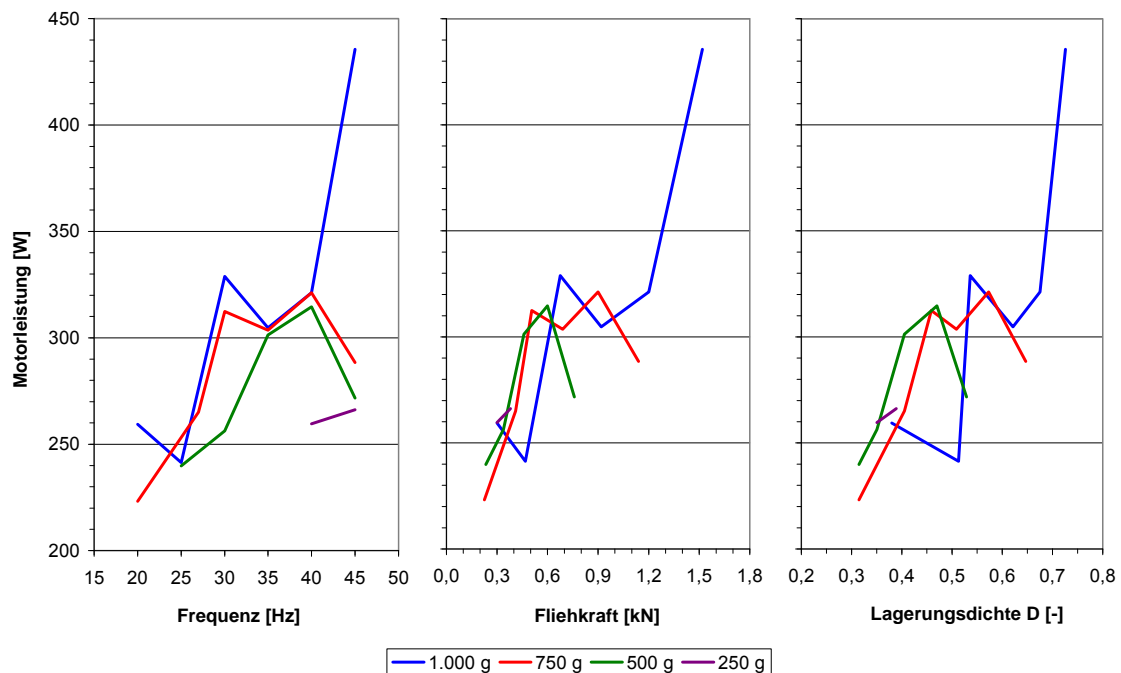


Bild 3.30: Maximale Motorleistung des Modellrüttlers während der Verdichtung in Abhängigkeit von der Rüttlerfrequenz, -fliehkraft und der erzielten Lagerungsdichte

Die Motorleistung steigt grundsätzlich mit zunehmender Frequenz und Fliehkraft des Modellrüttlers an. Auch in Bezug auf die erzielte Lagerungsdichte stellt sich ein vergleichbarer Zusammenhang ein. Auf Grund der Schwankung der gemessenen Motorleistung ergibt sich jedoch keine reproduzierbare Korrelation zwischen der Motorleistung des Modellrüttlers und der Lagerungsdichte des Modellsandes.

3.5.6 Porenwasserdruckmessung und Bodenverflüssigung

In der Versuchsserie 2 erfolgte eine Variation der Rüttlerfrequenz, der Unwuchtmass und der Rüttlereintauchtiefe gemäß Tabelle 3.4. Der Porenwasserdruck (PWD) im Modellsand wurde rüttlernah während der Versuchsdurchführung mit einem Abstand von ca. 15 cm zum Modellrüttler in zwei Messebenen erfasst. Die untere Messebene 1 ist entsprechend der jeweiligen Eintauchtiefe des Rüttlers auf die Tiefe t der Unwuchtmass eingestellt worden. Die Tiefe der oberen Messebene 2 wurde mit $t/2$ festgelegt (Bild 3.31).

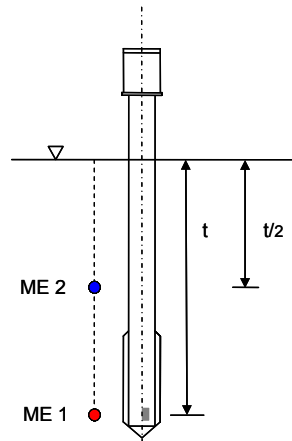


Bild 3.31: Positionierung der Porenwasserdruckaufnehmer in Abhängigkeit von der Eintauchtiefe des Modellrüttlers

In den Versuchen der Serie 2 stellte sich während des Verdichtungsvorganges ein charakteristischer Verlauf der Porenwasserdrücke ein, der exemplarisch in Bild 3.32 für die Kombination 35 Hz - 750 g - 1,0 m ($f - m_u - t$) dargestellt ist.

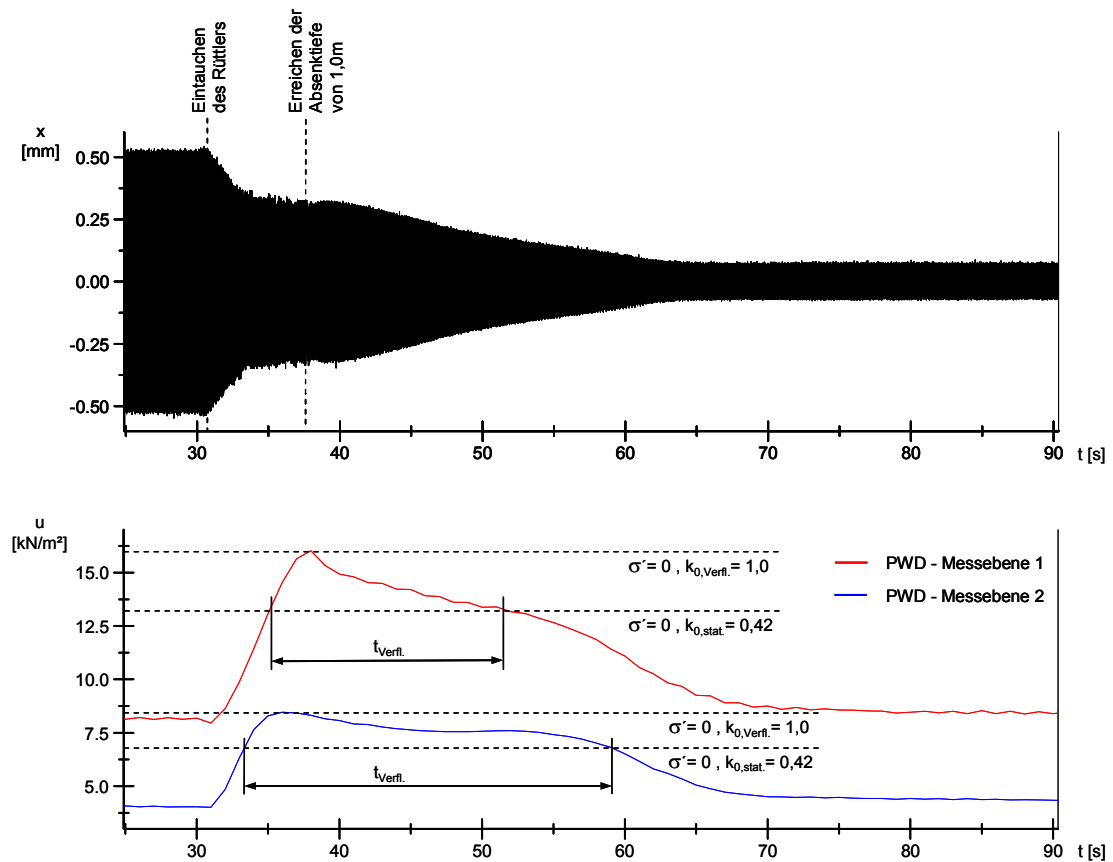


Bild 3.32: Amplitude der Rüttlerspitze und Porenwasserdruck der Messebenen 1 und 2 für 35 Hz – 750 g - 1,0 m

Nach dem Eintauchen des Rüttlers in den Modellsand nimmt die Rüttleramplitude, einhergehend mit der Dichte- und Steifigkeitserhöhung des Sandes, während des Verdichtungsvorganges ab (vgl. Kap. 3.5.1). Der Porenwasserdruck steigt an, sobald der Rüttler in den wassergesättigten Sand eindringt und erreicht sein Maximum, wenn die Solltiefe erreicht ist. Zu Beginn des eigentlichen Verdichtungsvorganges, ist der Sand locker gelagert und die Rüttleramplitude im Boden ist nach dem Abschluss des Absenkvorganges maximal. Für diesen Betriebszustand wird für alle Verdichtungsversuche dieser Serie ein Zeitintervall nachgewiesen, in dem eine Verflüssigung des Bodens eintritt. Bei Annahme einer konstanten totalen Spannung σ , überschreitet der Betrag der Porenwasserdruckzunahme $\Delta u_{\text{dyn.}}$ im Fall einer Verflüssigung die effektiven Korn-zu-Korn-Spannungen σ' . Der Boden weist nun nahezu keine bzw. nur noch eine geringe Scherfestigkeit auf und die einzelnen Sandkörner befinden sich in einer labilen Lage zueinander.

Die mittlere effektive Spannung σ'_0 ergibt sich zu

$$\sigma'_0 = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad [\text{kN/m}^2],$$

mit

$$\sigma'_1 = \gamma' \cdot h \quad [\text{kN/m}^2],$$

$$\sigma'_2 = \sigma'_3 = k_0 \cdot \sigma'_1 \quad [\text{kN/m}^2],$$

mit $1 - \sin \varphi < k_0 < 1,0$.

Statischer Zustand: $\sigma_0 = \sigma'_0 + u_{\text{stat.}} = \text{konst.}$

Dynamische Belastung: $\sigma_0 = \sigma'_0 + u_{\text{stat.}} + \Delta u_{\text{dyn.}}$

es gilt für $\sigma_0 = u_{\text{stat.}} + \Delta u_{\text{dyn.}}$

$$\Rightarrow \sigma'_0 = 0$$

In Abhängigkeit vom Porenwasserdruck ist der Erddruckbeiwert mit der Zunahme der Bodenverflüssigung nicht konstant. Ausgehend vom statischen Ruhedruckbeiwert steigt der Erddruckbeiwert bis auf 1,0 für den vollständig verflüssigten Zustand an. Die horizontale Spannungskomponente ist daher zu Beginn des Verflüssigungsvorganges kleiner, als die vertikale Spannungskomponente. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass sich die Bodenverflüssigung und somit die leichte Ver-

schieblichkeit der Sandkörner zunächst in horizontaler Richtung einstellt. Mit dem weiteren Anstieg des Porenwasserdruckes schreitet auch die Verflüssigung fort, bis sich mit dem Erreichen eines hydrostatischen Spannungszustandes ($k_0 = 1,0$) eine vollständige Verflüssigung des Bodens eingestellt hat.

Im Zuge der Dichteerhöhung des Bodens wird der Rüttlerbewegung ein zunehmender Widerstand entgegengesetzt. Die Umlagerung der Bodenkörner in eine dichtere Lagerung bewirkt, dass über das Korngerüst der Rüttlerschwingung eine Bodenreaktionskraft entgegenwirkt. Die Rüttleramplitude nimmt bei einer unveränderten dynamischen Belastung und einer konstanten Fliehkraft des Rüttlers ab. Hieraus resultiert ein Absinken des Porenwasserdruckes. Für $\Delta u_{\text{dyn.}} < \sigma'$ ist die notwendige Bedingung für die Bodenverflüssigung nicht mehr erfüllt. Die Dauer der Verflüssigung bzw. bis zum Abbau des Porenwasserüberdruckes hängt im Wesentlichen von der Rüttleramplitude, der einwirkenden Fliehkraft und dem Überlagerungsdruck ab.

Durch die hohe Messgenauigkeit der verwendeten Porenwasserdruckaufnehmer kommt es bereits bei geringen Differenzen in der Füllhöhe des Modellsandes bzw. des Wasserstandes im Versuchsschacht zu messbaren Differenzen des statischen Porenwasserdruckes vor dem Beginn der Verdichtungsversuche. Die Änderung der Porenwasserdrücke während der Verdichtung wird deshalb am anschaulichsten durch eine Normierung in Bezug auf den statischen Porenwasserdruck dargestellt. In Bild 3.33 ist die Entwicklung der normierten Porenwasserdrücke während der Verdichtungsversuche der unteren Messebene 1 für eine Rüttlertiefe von 0,80 m und einer Unwuchtmasse von 750 g veranschaulicht. Es wird deutlich, dass sich unmittelbar nach dem der Modellrüttler die jeweilige Absenktiefe erreicht hat, der maximale Porenwasserdruck einstellt. Ab diesem Zeitpunkt beginnt der eigentliche Verdichtungsprozess und der Rüttler schwingt in dem noch locker gelagerten Boden mit der größtmöglichen Amplitude.

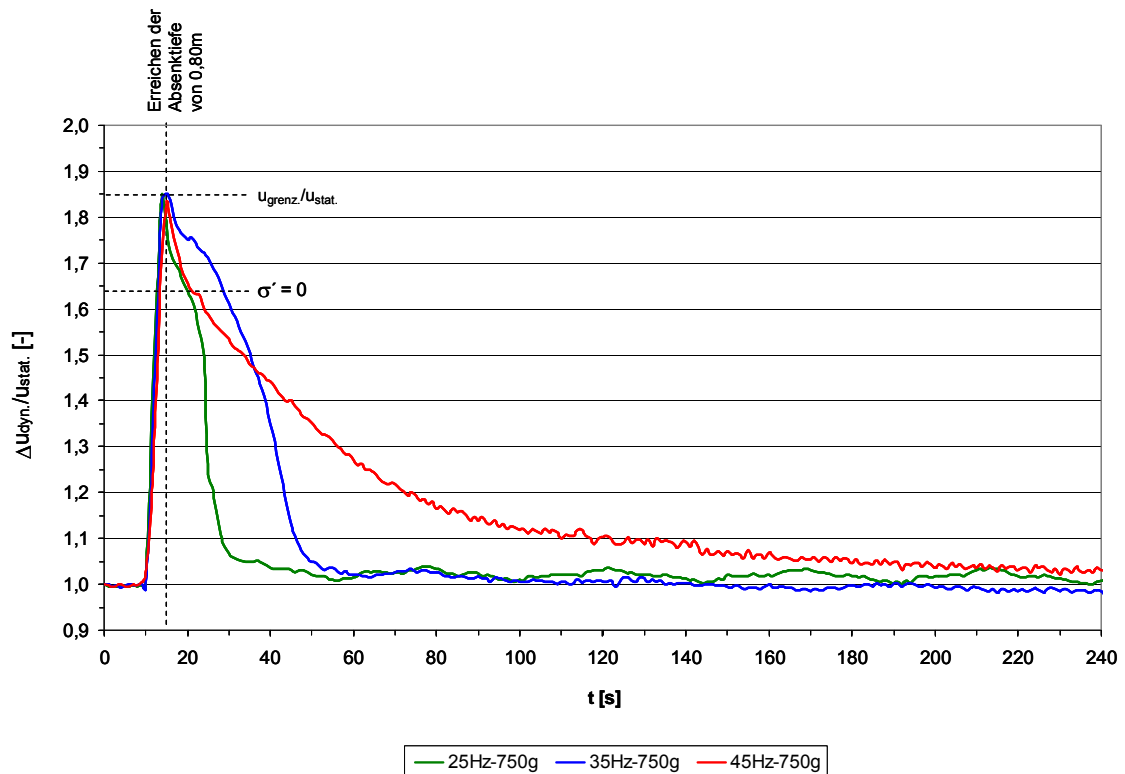


Bild 3.33: Normierter Porenwasserdruck für die Unwuchtmasse 750 g und eine Eintauchtiefe von 0,80 m für die Messebene 1

In allen Versuchen nimmt das Maximum des normierten Porenwasserdruckes einen mittleren Wert von ca. 1,85 an, unabhängig von der Rüttlerfrequenz, der Unwuchtmasse und der Eintauchtiefe. Dies bedeutet, dass der Porenwasserdruck nur bis zu einem Maximalwert $u_{\text{Grenz.}}$ steigerbar ist. Der Porenwasserdruck wird hierbei durch den möglichen Gegendruck begrenzt, der aus der Überlagerung in der jeweiligen Tiefe resultiert. Im Verflüssigungszustand war es nicht möglich, den Porenwasserdruck über den Maximalwert $u_{\text{Grenz.}}$ hinaus zu steigern, auch wenn die Rüttlerfliehkraft weiter erhöht wurde. Die Porenwasserdruckänderung und die normierten Maximalwerte des Porenwasserdruckes der Versuchesserie 2 sind für die Messebene 1 in Bild 3.34 zusammengefasst.

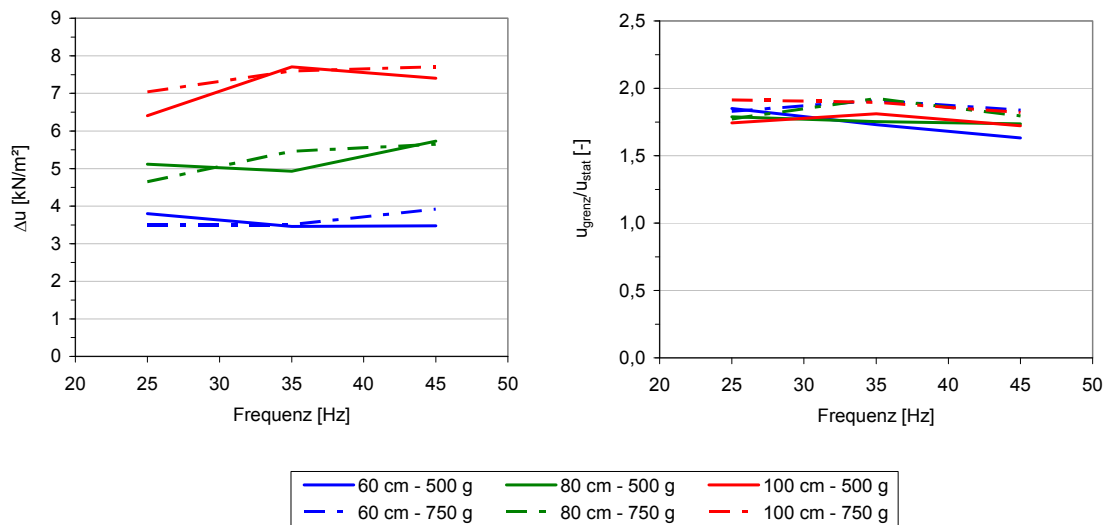


Bild 3.34: Porenwasserdruckänderung und auf den statischen Porenwasserdruck normierte Darstellung der Versuchsserie 2 für die Messebene 1

Die Messungen der Rüttlerbewegung und des Porenwasserdruckes belegen, dass es auch während des Verflüssigungsvorganges zu einer Verdichtung des Bodens kommt. Dies wird im Zeitintervall der Bodenverflüssigung durch die Abnahme der Rüttleramplitude belegt, die nur bei einer Steifigkeits- und Dichteerhöhung des umgebenden Bodens erfolgt. Insbesondere in der Übergangsphase der Bodenverflüssigung, in der das Korngerüst durch den Abbau des Porenwasserüberdruckes wieder beginnt Spannungen aufzunehmen, ist eine deutliche Abnahme der Rüttleramplitude zu verzeichnen (Bild 3.32). In dieser Übergangsphase ist einerseits die Verschieblichkeit des Korngefüges in eine dichtere Lagerung durch den erhöhten Porenwasserdruck leicht möglich, andererseits befinden sich die Sandkörner nicht mehr in einer labilen Lagerung zueinander, sondern nehmen über die Kontaktpunkte wieder Spannungen auf.

Im Zuge der verdichtungsbedingten Abnahme der Rüttleramplitude nimmt der Porenwasserüberdruck weiter ab. Die Dauer des Druckabbaus wird durch die Rüttlerfliehkraft und den Überlagerungsdruck bestimmt (Bild 3.35). Je größer die Fliehkraft und je geringer der Überlagerungsdruck ist, umso länger ist das Zeitintervall bis der Porenwasserdruck das Niveau des statischen Ausgangsdruckes wieder erreicht hat.

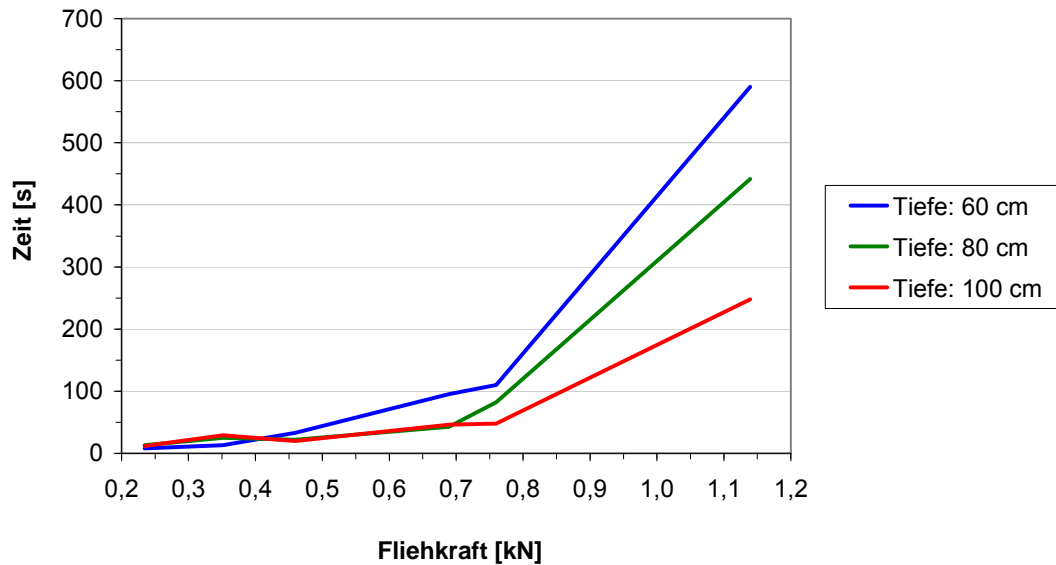


Bild 3.35: Erforderliche Zeit bis zum Abbau des Porenwasserüberdruckes auf den statischen Ausgangswert

3.5.7 Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System

Systemresonanzen können auftreten, wenn die Anregung eines Systems nahe der Eigenfrequenz erfolgt. In der Festigkeitslehre können Resonanzen verlässlich bewertet werden, da in der Regel für die Eigenfrequenz ω_0 gilt:

$$\omega_0 = \text{konstant}$$

Das Ziel der dynamischen Tiefenverdichtung besteht in der Erhöhung der Lagerungsdichte des anstehenden Bodens. Dabei kommt es zu einer wesentlichen Änderung der Dichte, Steifigkeit und der Dämpfungseigenschaften des Bodens. Deshalb muss bei der Untersuchung von Resonanzzuständen des Rüttler-Boden-Systems berücksichtigt werden, dass die Eigenfrequenz eine vom Fortschritt des Verdichtungs Vorganges abhängige und somit veränderliche Größe ist. Die Eigenfrequenz wird im Wesentlichen von der Dichte des Bodens und der maßgeblichen Überlagerungsspannung beeinflusst:

$$\omega_0 = f(D, \sigma)$$

Mit der Variation der Verfahrensparameter (s. Kapitel 3.4) wurde in dieser Arbeit auch untersucht, ob sich Resonanzzustände im Rüttler-Boden-System einstellen und wie

diese messtechnisch identifiziert werden können. Die messtechnische Identifikation erfolgt im Wesentlichen durch die Bewertung von zwei Kriterien. Eine Systemresonanz liegt vor, wenn:

1. die Unwuchtmasse der Rüttlerbewegung mit einem Vorlaufwinkel von 90° vorausseilt,
2. Punkt 1 erfüllt ist und sich zudem eine Überhöhung der Rüttleramplitude einstellt.

Gemäß Kapitel 2.3.1.3 kann mit der Kenntnis des Vorlaufwinkels auch das Verhältnis der Erregerfrequenz des Rüttlers zur Systemeigenfrequenz bewertet werden. Es gilt:

$0^\circ < \varphi < 90^\circ$	für	$\Omega < \omega_0$	
$\varphi = 90^\circ$	für	$\Omega = \omega_0$	Resonanzfall
$90^\circ < \varphi < 180^\circ$	für	$\Omega > \omega_0$	

Eine Aussage über den Betrag der Systemeigenfrequenz kann auf Grundlage dieser Einordnung allerdings nicht erfolgen. Dies ist durch eine Rückrechnung mit einem analytischen Ersatzsystem (z.B. Fundamentmodell) möglich. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in Kapitel 4.2.3 vorgestellt.

Im Rahmen der durchgeführten Verdichtungsversuche konnten zwei grundsätzliche Arten von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System nachgewiesen werden. Im ersten Fall nahm die Rüttleramplitude im Zuge des Verdichtungsvorganges ab, bei einer gleichzeitigen Reduzierung des Vorlaufwinkels. Dies belegt eine Zunahme der Systemeigenfrequenz im Verhältnis zu der konstanten Erregerfrequenz des Modellrüttlers. Beim Erreichen eines Vorlaufwinkels von 90° kam es zu einer deutlichen Amplitudenvergrößerung der Rüttlerbewegung. In diesem Resonanzfall kam es außerdem zu einer starken Abnahme der auf den Versuchsschacht übertragenen Schwingungen. Im Augenblick der Systemresonanz bildet sich offensichtlich um den Modellrüttler ein ringförmiger Bereich aus, in dem die Bodenkörner in Resonanz schwingen und nur noch stark reduziert Schwingungen auf den Versuchsschacht übertragen (Bild 3.36).

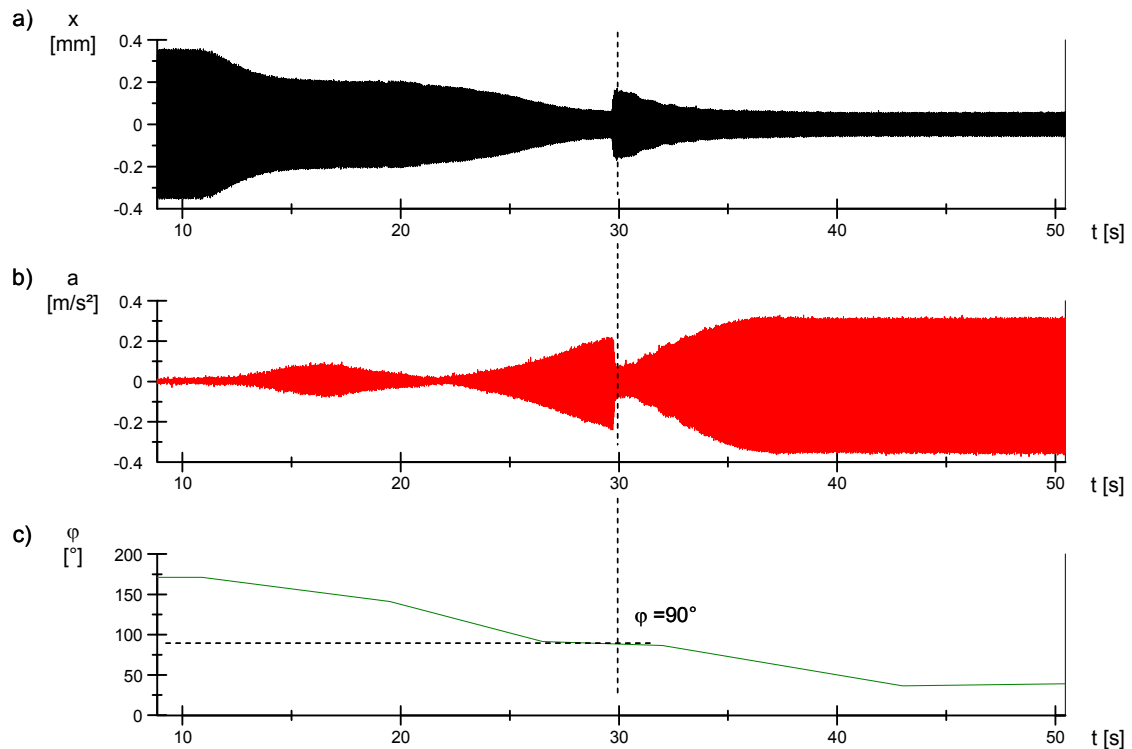


Bild 3.36: Resonanz im Rüttler-Boden-System Fall 1 / 40 Hz - 500 g - 1,20 m

- a) Rüttleramplitude Messebene 1 / Rüttlerspitze
- b) Beschleunigungssignal am Versuchsschacht
- c) Vorlaufwinkel

Der Resonanzzustand dauerte in dem dargestellten Beispiel (40 Hz - 500 g - 1,20 m) in Bezug auf die Amplitudenvergrößerung etwa 1,5 Sekunden an, wobei der Vorlaufwinkel für ca. 5 Sekunden einen Wert von 90° annahm. Die Messwertdarstellung in Bild 3.36 zeigt zudem, dass es erst zu einer Amplitudenvergrößerung gekommen ist, nachdem der Vorlaufwinkels von 90° für ca. 3,5 Sekunden konstant blieb. Offensichtlich ist für das Rüttler-Boden-System eine Einschwingzeit im resonanznahen Bereich erforderlich, bis eine Amplitudenvergrößerung möglich werden kann. Anschließend wurde der Boden weiter verdichtet, was durch die fortschreitende Abnahme des Vorlaufwinkels und der Rüttleramplitude dokumentiert wird. Mit einer aktiven Steuerung des Modellrüttlers wäre durch die Anpassung der Frequenz eine Aufrechterhaltung der Systemresonanz möglich gewesen.

Bild 3.37 zeigt die detaillierte Rüttlerschwingung vor, während und nach der Amplitudenvergrößerung im Resonanzzustand. Vor der Resonanz schwingt der Rüttler harmonisch und die Schwingungsamplitude der unteren Messebene 1 ist größer als die

der darüber liegenden Messebene 2, d.h. der Modellrüttler beschreibt eine kegelförmige Bewegung im Boden (Bild 3.37, a). Im Resonanzfall vergrößert sich die Amplitude, wobei der gemessene Schwingweg der oberen Messebene 2 zum Teil dem der unteren Messebene 1 entspricht. Auch im Fall der Resonanz stellt sich keine Phasenverschiebung zwischen den Amplituden der zwei Messebenen ein. Es wurde somit keine Taumel- oder Verkippbewegung des Modellrüttlers dokumentiert (Bild 3.37, b). Nach der Systemresonanz reduziert sich die Rüttlerschwingung und der Vorlaufwinkel, analog zu den vorangehend beschriebenen Verdichtungsversuchen (Bild 3.37, c).

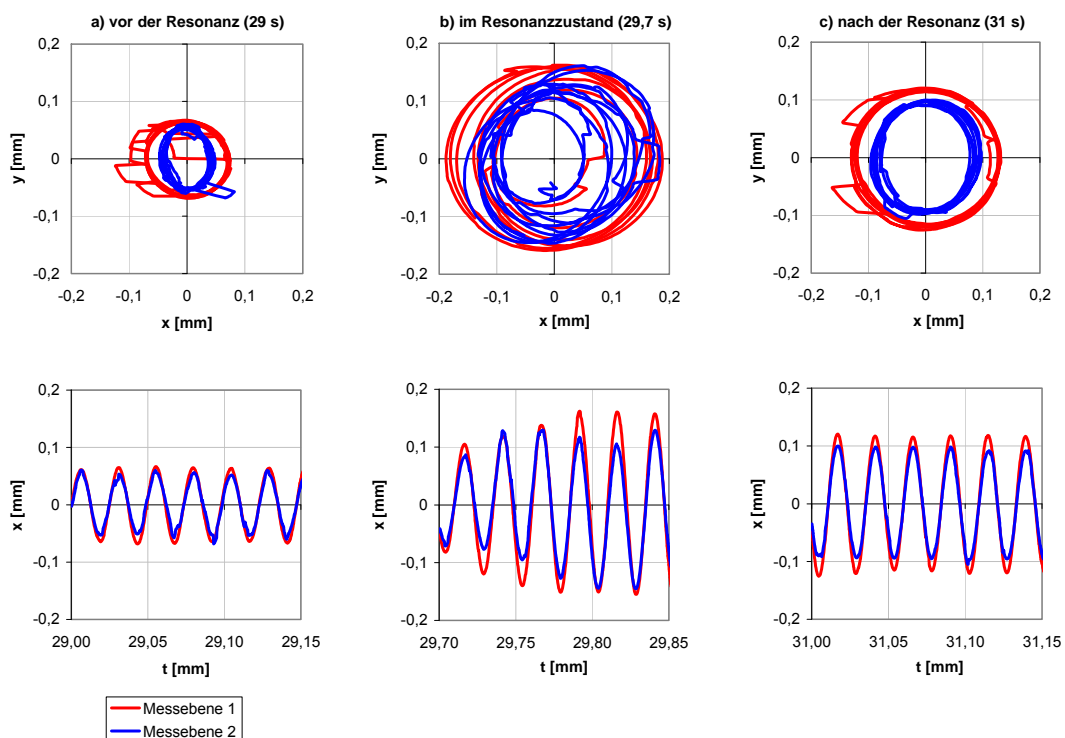


Bild 3.37: Resonanz im Rüttler-Boden-System Fall 1 / 40 Hz – 500 g - 1,20 m

- a) vor der Resonanz
- b) im Resonanzzustand
- c) nach der Resonanz

Im zweiten Fall der Systemresonanz stellten sich die Messparameter analog zu Fall 1 dar, allerdings fehlt eine Vergrößerung der Rüttleramplitude (Bild 3.38). Dass dieser Fall auch ohne direkte Vergrößerung der Rüttleramplitude als Systemresonanz zu bewerten ist, wird wie folgt begründet:

Eine Amplitudenvergrößerung kann sich am Modellrüttler nur einstellen, wenn der Boden direkt um den Rüttler ausreichend locker gelagert ist. Bis zum Erreichen eines Vorlaufwinkels von 90° kann der den Rüttler unmittelbar umgebende Boden (Bild 3.39 /

Zone 1) aber bereits so stark verdichtet sein, dass eine Vergrößerung der Rüttleramplitude im Resonanzfall nicht mehr möglich ist. Der Rüttler ist im Boden eingespannt und die bereits aktivierten Bodenreaktionskräfte wirken der Rüttlerbewegung entgegen. Trotzdem wurden auf den Versuchsschacht bei einem Vorlaufwinkel von 90° kaum Schwingungen übertragen.

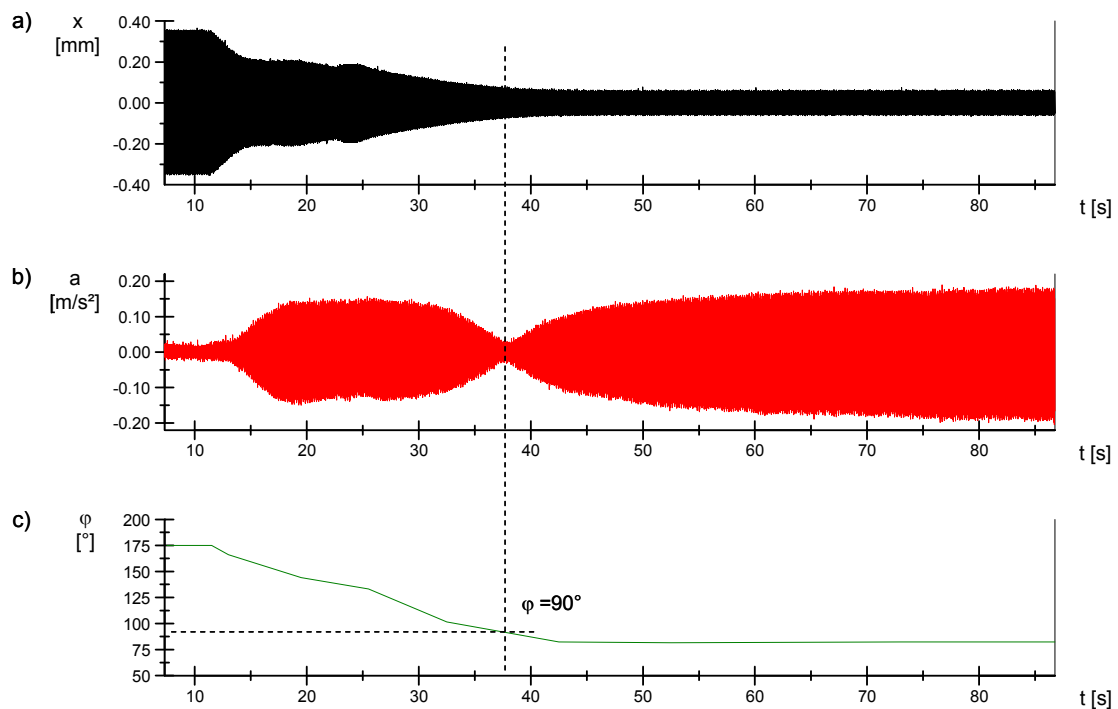


Bild 3.38: Resonanz im Rüttler-Boden-System Fall 2 / 45 Hz – 500 g - 1,0 m

- a) Rüttleramplitude Messebene 1 / Rüttlerspitze
- b) Beschleunigungssignal am Versuchsschacht
- c) Vorlaufwinkel

Die verdichtete Bodenmasse um den Rüttler (Zone 1, Nahfeld) wird zu einer Schwingung angeregt und dieses Rüttler-Boden-System ruft in der Zone 2 eine Resonanz hervor. Das Diagramm in Bild 3.39 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Ist zum Zeitpunkt der Resonanz ($t_{\text{Res.}}$ für $\varphi = 90^\circ$) im rüttlernahen Bereich die Lagerungsdichte überschritten, bei der durch Messung der Rüttlerschwingung die Resonanz detektiert werden kann ($D_{\text{Res.}}$), stellt sich im Abstand von $r_{\text{Res.}}$ eine Resonanz in der Schwingung der Bodenkörner ein. Voraussetzung hierfür ist, dass die Verfahrensparameter Rüttlerfrequenz und Unwuchtmassse auf die Arbeitstiefe und somit den Spannungszustand abgestimmt sind. Vergleichsberechnungen mit einem analytischen Ersatzmodell werden hierzu in Kapitel 4 beschrieben.

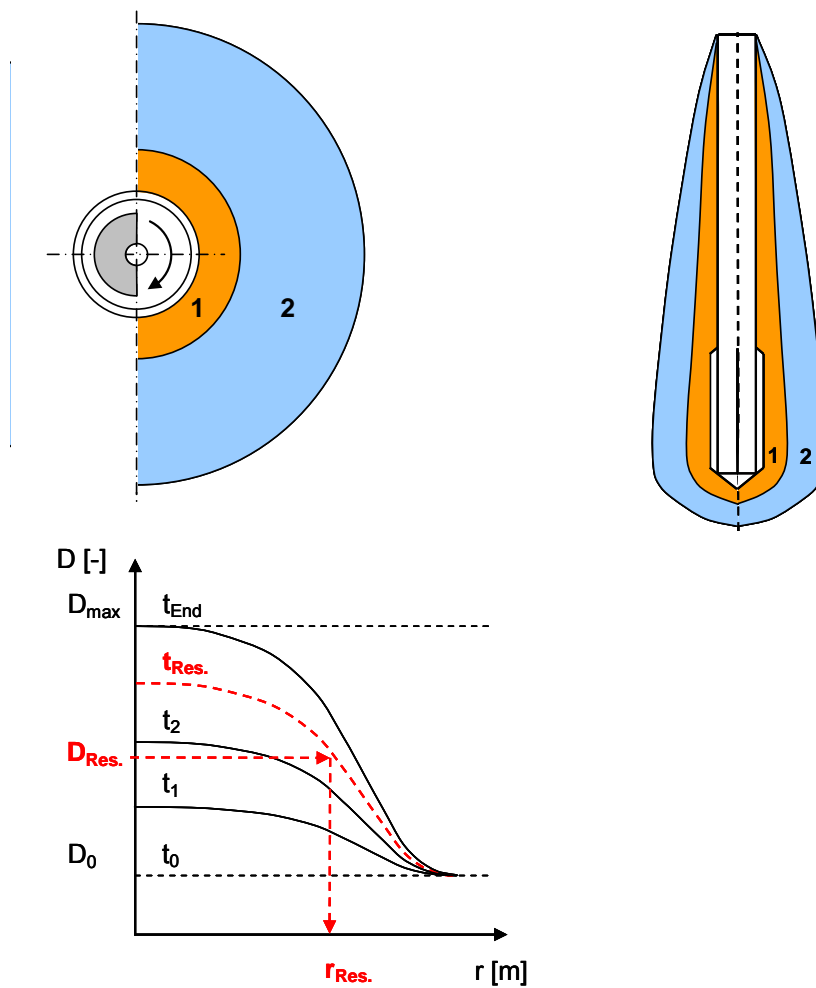


Bild 3.39: Modell zur Beschreibung von Resonanzen im Rüttler-Boden-System ohne Amplitudenvergrößerung am Tiefenrüttler

Die Auswertung der großmaßstäblichen Modellversuche zu Resonanzerscheinungen mit Tiefenrüttlern belegt, dass mit Hilfe des Vorlaufwinkels das schwingende System von Rüttler und Boden bewertet werden kann. Der Vorlaufwinkel stellt somit neben der Rüttlerbewegung einen sinnvollen Steuerungsparameter für eine Mess- und Regelungstechnik des Rütteldruckverfahrens dar.

3.5.8 Intervallziehen des Modellrüttlers

Zur Abbildung des in situ Verfahrensablaufes der Rütteldruckverdichtung, wurde am Beispiel der Frequenz-Unwucht-Kombination 40 Hz - 500 g der Modellrüttler bis in die Tiefe von 1,20 m abgesenkt und anschließend in 4 Intervallen à 30 cm gezogen. Die

Haltedauer betrug einheitlich 180 Sekunden. Die charakteristischen Messsignale sind in Bild 3.40 dargestellt.

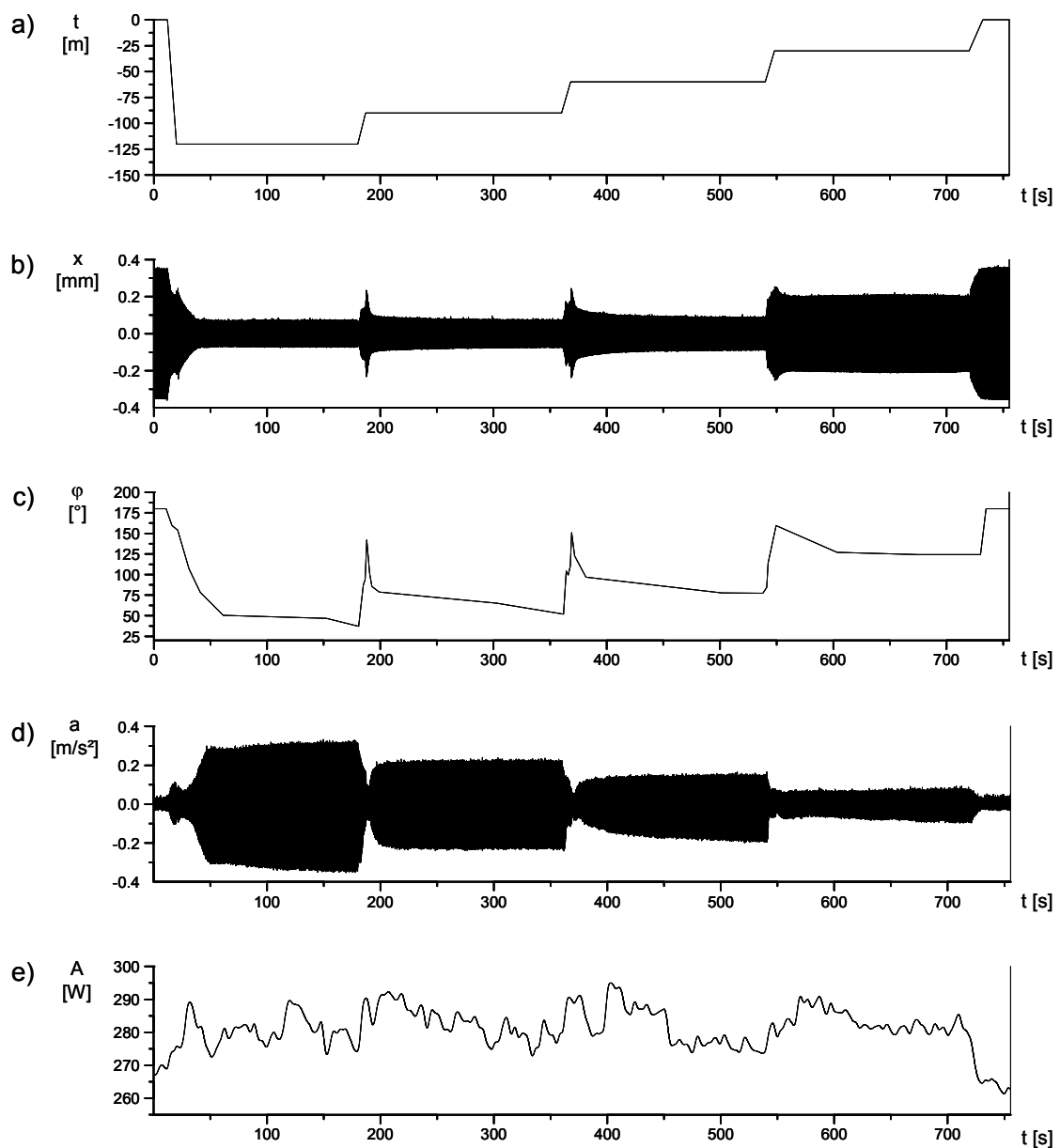


Bild 3.40: Ziehen des Modellrüttlers in vier Intervallen à 30 cm, $f = 40$ Hz, $m_u = 500$ g

- a) Eintauchtiefe des Modellrüttlers
- b) Rüttleramplitude Messebene 1 / Rüttlerspitze
- c) Vorlaufwinkel
- d) Beschleunigungssignal am Versuchsschacht
- e) Motorleistung

Mit einer Rüttlertiefe von 1,20 m stellen sich im ersten Intervall die Messsignale der Rüttleramplitude, des Vorlaufwinkels, der übertragenen Schwingungen auf den Versuchsschacht und die Leistung des Rüttlermotors äquivalent zu dem entsprechenden

Versuch der Serie 1 ein. Während des Ziehvorganges vergrößert sich die Amplitude der Rüttlerbewegung. Entsprechend den Ergebnissen der Versuchsserie 1, stellt sich im Bereich der Rüttlerspitze die größte Dichte im Modellsand ein (vgl. Kapitel 3.5.2). Wird der Rüttler gezogen, ist er von einem weniger dichten Boden umgeben und es kommt zu einer weiteren Verdichtung. Dies wird durch eine Vergrößerung der Rüttleramplitude und des Vorlaufwinkels bei jedem Ziehvorgang dokumentiert. Im Zuge der weiter fortschreitenden Verdichtung nehmen Amplitude und Vorlaufwinkel wieder ab. Auch beim Intervallziehen des Modellrüttlers wird bestätigt, dass die Messung der Motorleistung (Kapitel 3.5.5) keinen klar interpretierbaren Zusammenhang in Bezug auf den Verdichtungszustand des umgebenen Modellsandes liefert (Bild 3.40, e).

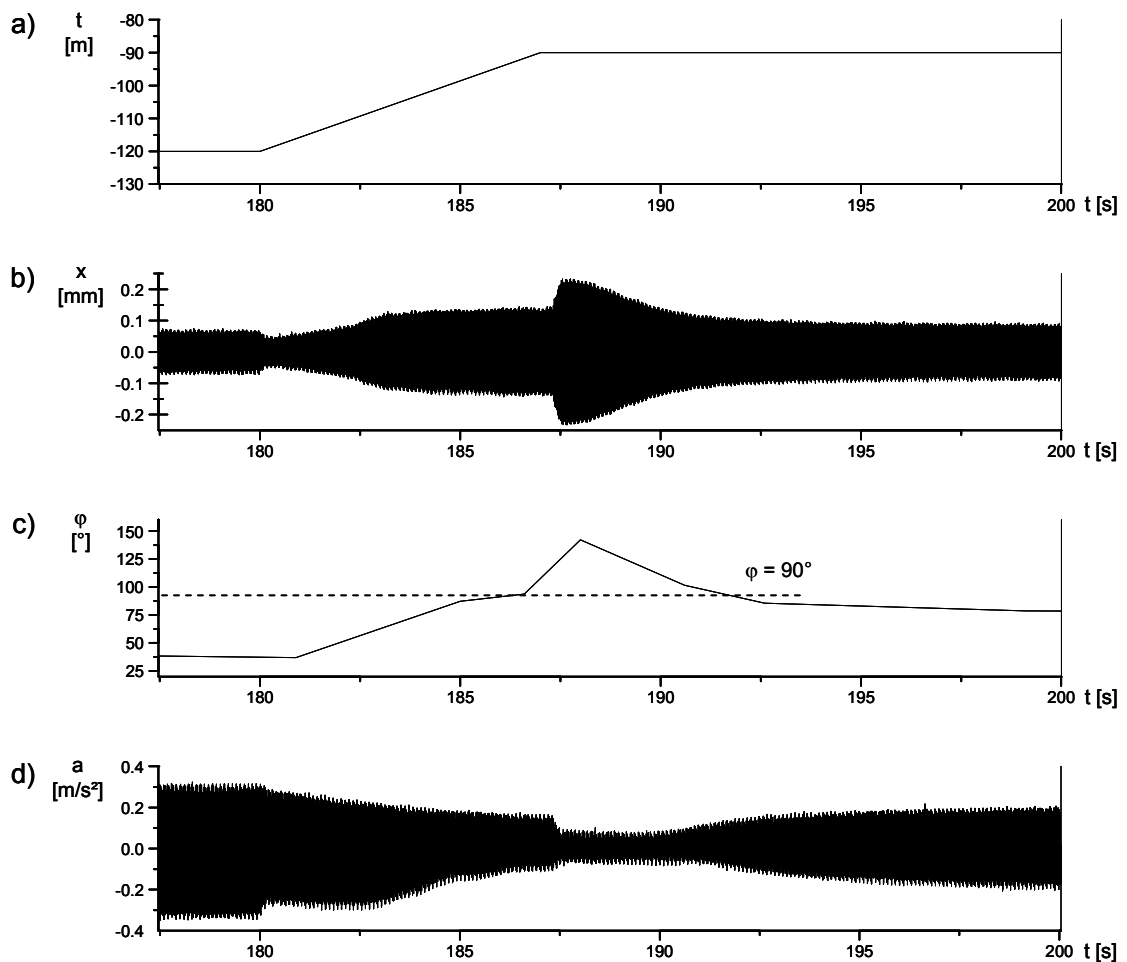


Bild 3.41: Detail des Ziehvorganges des Modellrüttlers von $t = 1,20$ m auf $t = 0,90$ m

- a) Eintauchtiefe des Modellrüttlers
- b) Rüttleramplitude Messebene 1 / Rüttlerspitze
- c) Vorlaufwinkel
- d) Beschleunigungssignal am Versuchsschacht

Bild 3.41 zeigt das Detail des Ziehvorganges des Modellrüttlers von einer Tiefe von 1,20 m auf 0,90 m. Nachdem die Vertikalbewegung des Modellrüttlers zum Stillstand gekommen ist, vergrößert sich die Rüttleramplitude deutlich, während auf den Versuchsschacht annähernd keine Schwingungen mehr übertragen werden. Der Vorlaufwinkel durchläuft bei diesem Vorgang zwei Mal den Resonanzwert von 90° (Bild 3.41, c). In Analogie zu den vorangehend beschriebenen Resonanzerscheinungen (Kapitel 3.5.7), kann auch dies als ein resonanznaher Zustand des Rüttler-Boden-Systems bewertet werden.

Darüber hinaus kann es auch zu einer Überlagerung des Resonanzzustandes mit einer Verflüssigung des Modellsandes kommen. Grundsätzlich ist es bei der Rütteldruckverdichtung, d.h. bei einer hochfrequenten dynamischen Anregung eines zumeist wasser-gesättigten Sandes nicht immer möglich, die Mechanismen der Resonanz und der Bodenverflüssigung getrennt voneinander zu bewerten. Diesen Mechanismen ist gemein, dass sich die Bodenkörner in einer labilen und somit leicht verschieblichen Lage zueinander befinden. Beide Mechanismen können in Interaktion zueinander stehen bzw. sich gegenseitig überlagern.

3.6 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Ergebnisse des versuchstechnischen Teils dieser Arbeit werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Amplitude der Rüttlerschwingung im Boden wird durch die Rüttlerfrequenz und Unwuchtmasse bestimmt. Die räumliche Bewegung des Rüttlers im Boden beschreibt eine Kegelform. Taumelbewegungen des Modellrüttlers wurden nicht festgestellt.
- Mit dem Dichte- und Steifigkeitszuwachs des Modellsandes während des Verdichtungsvorganges nimmt die Amplitude der Rüttlerschwingung auf einen konstanten Wert ab, sobald sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der einwirkenden Rüttlerfliehkraft und den aktivierbaren Reaktionskräften des anstehenden Bodens eingestellt hat. Das Erreichen der Amplitudenkonstanz wird für die untersuchten Frequenz-Unwucht-Kombinationen von der Anzahl der Belastungszyklen und nicht von der Dauer der dynamischen Einwirkung bestimmt.

- Die größte Lagerungsdichte stellt sich im Bereich der Rüttlerspitze ein. Bei Fliehkraftgleichheit erzeugt eine große Unwucht mit einer niedrigen Frequenz eine höhere Dichte im Nahbereich des Rüttlers, während für den untersuchten Fall des wassergesättigten Modellsandes eine größere Verdichtungsreichweite mit einer kleinen Unwuchtmasse und einer hohen Rüttlerfrequenz erzielt wird.
- Der Verdichtungsprozess außerhalb des Nahbereiches des Rüttlers schreitet mit abnehmender Verdichtungsgeschwindigkeit voran, auch wenn dieser durch die Messung der Rüttlerbewegung nicht mehr detektiert werden kann.
- Die Auswertung der Motorleistung des Rüttlers gestattet keinen direkten Rückschluss auf die erzielte Lagerungsdichte.
- Bei allen Verdichtungsversuchen mit Porenwasserdruckmessung wurde im Nahbereich des Modellrüttlers für den wassergesättigten Modellsand eine Bodenverflüssigung nachgewiesen. Der Porenwasserdruck steigt unabhängig von der Rüttlerfliehkraft nur bis zu einem Grenzwert, der vom Überlagerungsdruck bestimmt wird. Auch während der Bodenverflüssigung schreitet die Verdichtung des Modellsandes voran. Eine besonders effektive Verdichtung wurde im Übergangsbereich der abnehmenden Bodenverflüssigung dokumentiert.
- In den Modellversuchen haben sich im Rüttler-Boden-System Resonanzerscheinungen in unterschiedlicher Weise dargestellt. In einem Fall stellt sich bei einem Vorlaufwinkel von 90° eine Vergrößerung der Rüttlerschwingung ein. Die Amplitudenvergrößerung ist jedoch nur möglich, wenn das Zusammenwirken sowohl der Maschinenparameter Frequenz und Unwuchtmasse als auch des Überlagerungsdruckes und der Lagerungsdichte abgestimmt ist. Die Möglichkeit einer Amplitudenvergrößerung der Rüttlerschwingung wird entscheidend von der Lagerungsdichte des Bodens bestimmt, der den Rüttler unmittelbar umgibt. Ist die Lagerungsdichte bereits zu hoch bis sich ein Vorlaufwinkel von 90° eingestellt hat, wird keine Amplitudenvergrößerung gemessen. Aber auch für diesen Fall sind Systemresonanzen möglich. Durch die Auswertung der Schwingungsübertragung auf den Versuchsschacht konnten Resonanzerscheinungen im Modellsand auch ohne direkte Amplitudenvergrößerung am Modell-

rüttler nachgewiesen werden. Es wird belegt, dass mit Hilfe des Vorlaufwinkels das dynamische Schwingverhalten des Gesamtsystems von Rüttler und Boden bewertet werden kann.

4 Analytische Berechnung

Die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen analytischen Modellansätze bilden das Rüttler-Boden-System mittels Feder-Dämpfer-Systeme ab. Diese Modelle können als Berechnungsgrundlage für eine Mess- und Regelungstechnik für das Rütteldruckverfahren dienen. Das Berechnungsmodell in Analogie zu einer Fundamentalschwingung besitzt vier von der Lagerungsdichte beeinflusste Modellparametern (k , c , k_θ , c_θ) für die Bewegungen der Verschiebung und Verdrehung. In dem Modell der horizontalen Pfahlschwingung wird von horizontalen Bodenscheiben mit jeweils einer Feder und einem Dämpfer ausgegangen. Im Vergleich weist das Pfahlmodell nur zwei Modellparameter (k_x , c_x) auf. Mit den in Kapitel 2.3.2.2 genannten Annahmen und Voraussetzungen erfolgt eine Reduzierung auf ein eindimensionales System. Es wird deutlich, dass dieses Modell den Freiheitsgraden der Rüttlerbewegung weniger gut gerecht wird. Zudem setzt das Pfahlmodell eine allseitige Umschließung des Pfahles im Boden voraus. Bei der Rotationsbewegung des Tiefenrüttlers wird jedoch immer nur ein einseitiger Bodenkontakt angenommen. Auch in diesem Bezug bildet das Modell in Analogie zu einer Fundamentalschwingung die Randbedingungen des Tiefenrüttlers realitätsnäher ab. Vergleichsberechnungen haben ferner belegt, dass mit dem Pfahlmodell in Bezug auf die Ergebnisse der Modellversuche zu kleine Amplituden der Rüttlerbewegung ermittelt werden, bzw. unrealistisch große Werte für die Modellparameter der Dämpfung und Steifigkeit. Aus den vorangehend genannten Gründen ist das Fundamentmodell als Ersatzsystem für das betrachtete Rüttler-Boden-System besser geeignet und wird für die folgenden Validierungsuntersuchungen verwendet.

Auf der Grundlage der in Kapitel 3 beschriebenen großmaßstäblichen Modellversuche wird in diesem Kapitel das Fundamentmodell mittels Vergleichs- und Rückrechnungen der Messergebnisse bewertet. Darauf aufbauend wird die Möglichkeit der rechnerischen Abbildung von Systemresonanzen analysiert und die Größenordnung der anzupassenden Rüttlerfrequenz beschrieben, die erforderlich ist, um den Verdichtungsprozess möglichst lange im resonanznahen Bereich durchführen zu können.

4.1 Bodendynamische Kennwerte des Modellsandes

Die dynamischen Kennwerte des Modellsandes werden im Wesentlichen durch den Spannungszustand, die Lagerungsdichte, die Wassersättigung und die Größe der Schubverzerrung beeinflusst.

Die vertikale bzw. horizontale effektive Spannung im Boden wird nach den bekannten Beziehungen ermittelt:

$$\sigma_1' = \gamma' \cdot h \quad [\text{kN/m}^2] , \quad (4.1)$$

$$\sigma_2' = \sigma_3' = k_0 \cdot \sigma_1' \quad [\text{kN/m}^2] . \quad (4.2)$$

Der Erdruhedruckbeiwert für den Modellsand ergibt sich nach JAKY (1944) zu:

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \quad [-] . \quad (4.3)$$

Der Reibungswinkel des Modellsandes kann in Abhängigkeit von der Porenzahl und unter Berücksichtigung der durchgeführten Triaxialversuche (Kap. 3.3.3) in Anlehnung an JÄNKE (1968) wie folgt bestimmt werden:

$$\varphi = -17,07 \cdot e + 45,82 \quad [^\circ] . \quad (4.4)$$

Die mittlere effektive Spannung σ_0' folgt daraus zu

$$\sigma_0' = \frac{\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3'}{3} \quad [\text{kN/m}^2] . \quad (4.5)$$

DAS (1983) gibt für die Scherwellengeschwindigkeit c_s in einem trockenen Sand eine Formel in Abhängigkeit von der mittleren effektiven Spannung und der Porenzahl e an. Für die Überprüfung der Gültigkeit dieses Zusammenhanges für den verwendeten wassergesättigten Modellsand sind am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Berlin Resonant Column (RC) Versuche durchgeführt worden. Die Versuche erfolgten an trockenem und wassergesättigtem Sand mit unterschiedlichen Lagerungsdichten. Darüber hinaus war das geringe Spannungsniveau im Modellversuchsstand bei einer durchschnittlichen Absenkung des Modellrüttlers von 1,20 m zu berücksichtigen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der RC-Versuche wurde die Formel nach DAS (1983) wie folgt kalibriert

$$c_s = 0,85 \cdot (11,36 - 5,35 \cdot e) \cdot \sigma_0'^{0,3} \quad [\text{m/s}] . \quad (4.6)$$

Aus der Scherwellengeschwindigkeit c_s und der Querdehnzahl ν lässt sich die Kompressionswellengeschwindigkeit c_p ermitteln

$$c_p = \frac{c_s}{\sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}}} \quad [\text{m/s}] . \quad (4.7)$$

Darin kann die Querdehnzahl für den Modellsand mit $\nu = 0,30$ abgeschätzt werden.

Der dynamische Schubmodul G_d stellt einen wesentlichen Parameter für die Berechnung der Modellparameter der Steifigkeit und Dämpfung der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Berechnungsmodelle dar.

$$G_d = c_s^2 \cdot \rho \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4.8)$$

mit

$$\rho = \frac{\rho_s}{1+e} \quad [\text{t/m}^3] . \quad (4.9)$$

Der dynamische Schubmodul nimmt mit wachsender Schubverzerrung γ ab. Bei sehr kleinen Schubverzerrungen ist der Einfluss der Materialdämpfung D_{mat} gegenüber der Abstrahlungsdämpfung sehr gering und kann vernachlässigt werden. Mit wachsender Schubverzerrung nimmt der Einfluss der Materialdämpfung dagegen zu, so dass diese bei großen Schubverzerrungen berücksichtigt werden muss. Die Angaben in der Literatur, ab welchem Betrag eine Schubverzerrung als groß zu bewerten ist, sind uneinheitlich. Nach KLEIN (2001) ist für Schubverzerrungen $\gamma > 10^{-5}$ der Schubmodul zu reduzieren und die Materialdämpfung zu berücksichtigen. Eine qualitative Darstellung des Einflusses der Größe der Schubverzerrung auf den normierten Schubmodul und die Materialdämpfung zeigt Bild 4.1.

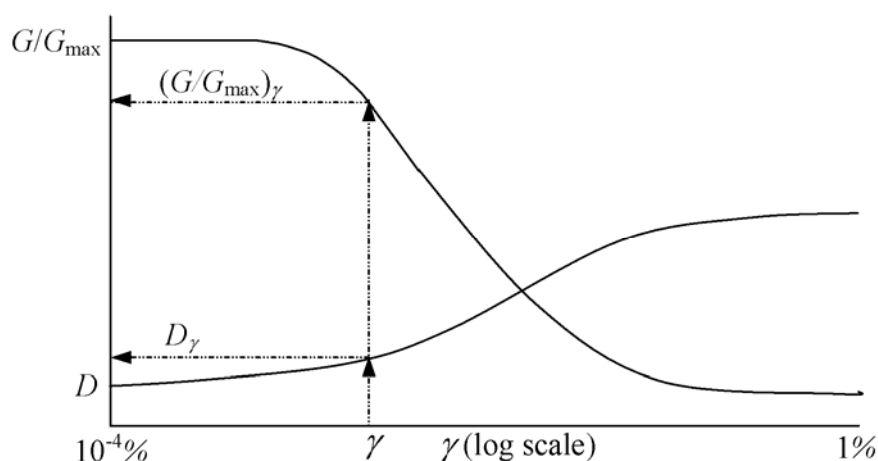


Bild 4.1: Einfluss der Schubverzerrung auf den Schubmodul und die Materialdämpfung aus GREEN (2001)

Der Zusammenhang der Schubverzerrung, des Reduktionsfaktors β und der Materialdämpfung ist in Tabelle 4.1 gegeben.

Tabelle 4.1: Abhängigkeit des Reduktionsfaktors und der Materialdämpfung von der Schubverzerrung, in Anlehnung an KLEIN (2001)

Schubverzerrung γ [-]	Reduktionsfaktor β [-]	Materialdämpfung D_{mat} [-]
10^{-2}	0,10	0,24
10^{-3}	0,25	0,16
10^{-4}	0,85	0,04
10^{-5}	1	0,02

Die Schubverzerrung wird in Analogie zu einer Fundamentalschwingung abgeschätzt. Hierbei wird angenommen, dass die Amplitude der Dehnung direkt unter dem Fundament noch nicht gedämpft ist (FELLIN, 2000). Die Scherverformungen können somit mit der gleichen Größenordnung angenommen werden. Die Abschätzung erfolgt in Abhängigkeit von der Amplitude des Rüttlers, der Erregerfrequenz und der Kompressionswellengeschwindigkeit.

$$\gamma \approx \frac{A \cdot \Omega}{c_p} \quad [-] \quad (4.10)$$

Die Schubverzerrungen, die durch den Modellrüttler während des Verdichtungs Vorganges im Modellsand erzeugt werden, liegen entsprechend den gemessenen Rüttleramplituden im Mittel zwischen 10^{-4} bis 10^{-3} . Für die folgenden Betrachtungen werden deshalb eine Reduzierung des Schubmoduls und die Materialdämpfung berücksichtigt. Der Reduktionsfaktor β und die Materialdämpfung D_{mat} können auf der Grundlage der Angaben in Tabelle 4.1 wie folgt approximiert werden

$$\beta = -0,143 \cdot \ln(\gamma) - 0,605 \quad (4.11)$$

und

$$D_{\text{mat}} = 0,034 \cdot \ln(\gamma) - 0,388 \quad (4.12)$$

Der reduzierte dynamische Schubmodul lässt sich in Abhängigkeit der Schubverzerrung errechnen aus

$$G_{\text{d,red}} = \beta \cdot c_s^2 \cdot \rho \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4.13)$$

4.2 Prognoseberechnung

Im Folgenden wird der Berechnungsablauf für den analytischen Modellansatz am Beispiel einer Prognoseberechnung für die Randbedingungen der Modellversuche dieser Arbeit (Kapitel 3) dargestellt. Es werden die bodendynamischen und verfahrenstechnischen Einflussgrößen und deren Veränderung im Zuge des Verdichtungs Vorganges bei der Anwendung des Rütteldruckverfahrens vorgestellt und erläutert.

4.2.1 Eingangsparameter Modellrüttler

Die geometrischen Rüttlerkennwerte stellen wichtige Eingangsparameter für das Berechnungsmodell dar. Der Modellrüttler wird dabei idealisiert als Stabpendel betrachtet. Die Abmessungen des Modellrüttlers sind Bild 3.2 zu entnehmen. Die Gesamtlänge beträgt 179,1 cm. Der Ruhepunkt ist der Punkt, an dem der Rüttler keine Auslenkung erfährt, d.h. die Amplitude gleich null ist. Aus der Auswertung der Versuchsreihe 1 (Kapitel 3.5) wurde der Ruhepunkt in einem Abstand z_0 von 79,1 cm bestimmt. Dieser Betrag ist von der Gesamtlänge des Rüttlers zu subtrahieren, so dass sich die effektive Länge ergibt zu

$$l_{\text{eff}} = l_{\text{ges}} - z_0 \quad [\text{m}] . \quad (4.14)$$

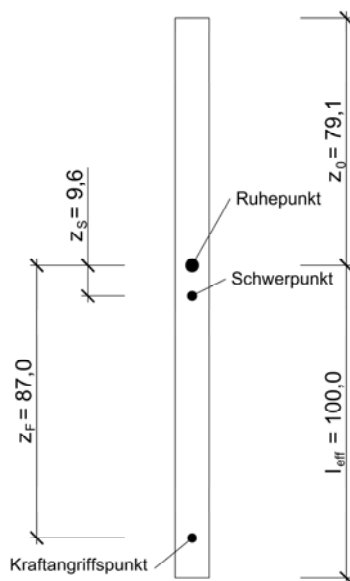


Bild 4.2: Abmessungen des als Stabpendel idealisierten Modellrüttlers (Maße in cm)

Von dort ausgehend wird der Abstand zum Schwerpunkt z_s mit 9,6 cm gemessen, die Entfernung zum Kraftangriffspunkt z_F der Unwucht beträgt 87,0 cm. Zur Veranschaulichung sind die Abmessungen in Bild 4.2 dargestellt. Die Masse des Modellrüttlers beträgt 60,72 kg, dazu ist die Masse m_u der jeweils montierten Unwucht zu addieren. Die Kennwerte des Modelltieferüttlers sind in der Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2: Kennwerte des Modellrüttlers

m [kg]	m_u [kg]	r_u [m]	f [Hz]	F [kN]	$\varnothing D$ [m]	z_F [m]	z_s [m]	z_0 [m]	z_{eff} [m]
60,72	0,25-1,0	0,019	20-45	0,23-1,52	0,108	0,87	0,096	0,791	1,00

4.2.2 Berechnungsablauf

Für die Steifigkeit k der Verschiebung werden der dynamische Schubmodul, die Querdehnzahl sowie die effektive Rüttlerlänge und der Durchmesser D benötigt. Die Steifigkeit k wird nach FELLIN (2000) und WOLF (1994) bestimmt mit

$$k = \frac{G_{d,red.} \cdot \frac{D}{2}}{1-\nu} \cdot \left[3,1 \cdot \left(\frac{I}{D} \right)^{0,75} + 1,6 \right] \quad [\text{N/m}] . \quad (4.15)$$

Die Dämpfung c der Verschiebung errechnet sich unter Berücksichtigung der Materialdämpfung, aus

$$c = \rho \cdot c_p \cdot D \cdot l + c_{mat.} \quad [\text{Ns/m}] \quad (4.16)$$

mit

$$c_{mat} = D_{mat} \cdot \frac{2 \cdot k}{\Omega} . \quad (4.17)$$

Für die Steifigkeit k_ϑ und Dämpfung c_ϑ der Verdrehung geben FELLIN (2000), GAZETAS (1991) und WOLF (1994) folgende Formeln an

$$k_\vartheta = K_\vartheta^{stat} \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{b_0^2}{1+b_0^2} \right) \quad [\text{N/m}] , \quad (4.18)$$

$$c_\vartheta = \frac{K_\vartheta^{stat}}{3} \cdot \frac{b_0^2}{1+b_0^2} \quad [\text{Ns/m}] . \quad (4.19)$$

Darin ist die statische Steifigkeit für das Kippen

$$K_\vartheta^{stat} = \frac{G l_s^{0,75}}{1-\nu} \left(\frac{I}{D} \right)^{0,25} \left[2,4 + 0,5 \frac{D}{I} \right] \quad (4.20)$$

mit dem Flächenmoment

$$I_s = \frac{D l^3}{12} + D l \left(z_s - \frac{l}{2} \right)^2 \quad (4.21)$$

mit

$$r_0 = \sqrt[4]{\frac{4 I_s}{\pi}} , \quad z_0 = \frac{9}{32} r_0 \pi \cdot (1-\nu) \left(\frac{c_p}{c_s} \right)^2 , \quad b_0 = \frac{z_0 \Omega}{c_p} . \quad (4.22)$$

Die Berechnung wird iterativ durchgeführt. Die Rüttlerbewegung und die daraus resultierende Schubverzerrung muss zunächst abgeschätzt werden. Auf dieser Grundlage erfolgt die Bestimmung des Reduktionsfaktors β , der Materialdämpfung D_{mat} und die Berechnung der Modellparameter der Dämpfung und Steifigkeit für die Verschiebung (k , c) und Verdrehung des Systems (k_ϑ , c_ϑ). Hieraus wird mit Gleichung 2.35 die Rütt-

lerbewegung berechnet und mit dem geschätzten Eingangswert verglichen. Ist eine Übereinstimmung gegeben, ist die Berechnung beendet. Das Ablaufschema der Berechnung zeigt Bild 4.3.

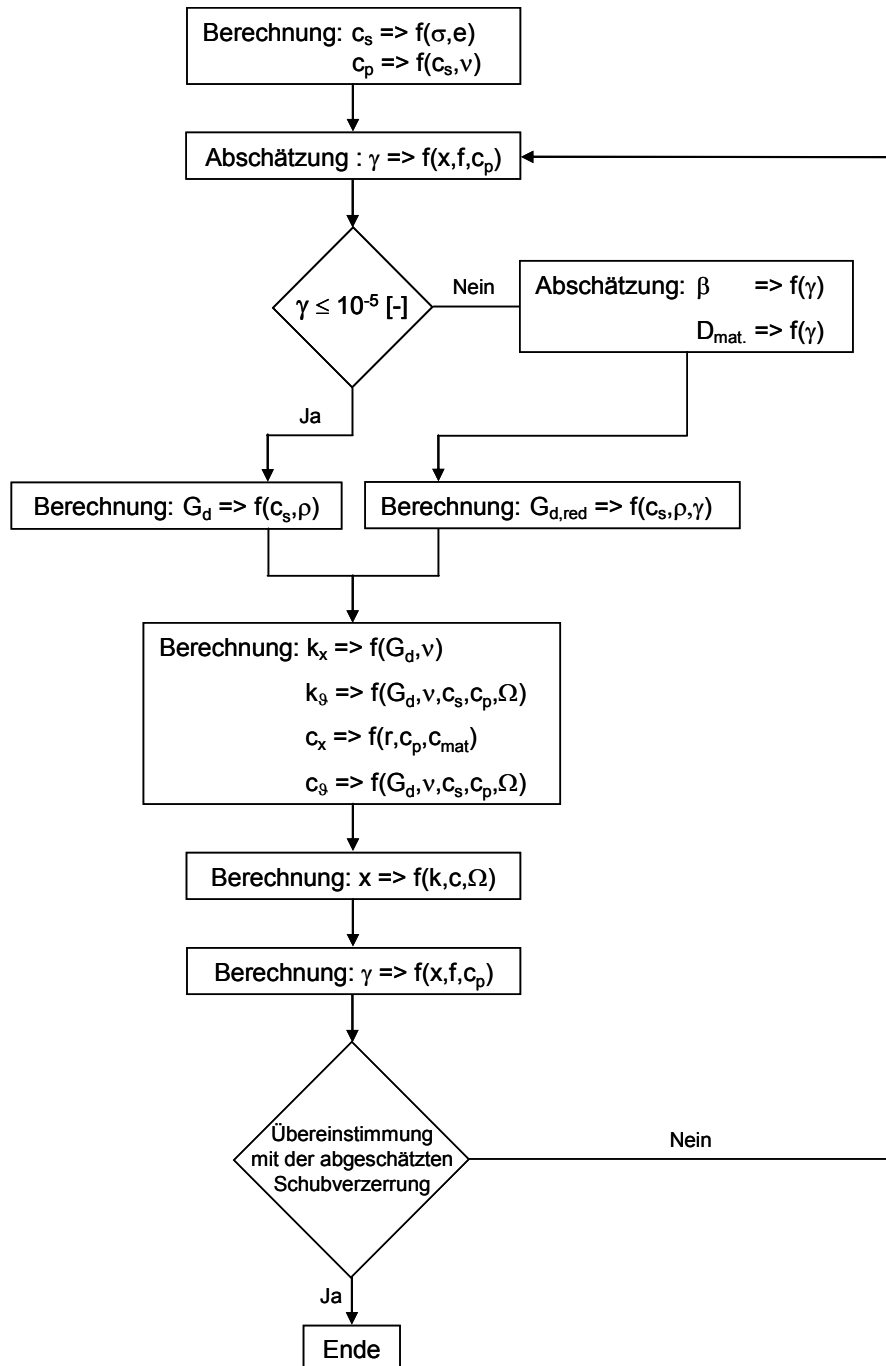


Bild 4.3: Ablaufschema der iterativen Berechnung

4.2.3 Berechnungsbeispiel für den Modellrüttler

Scher- und Druckwellengeschwindigkeit:

Die gemäß Gleichung 4.6 berechnete Scherwellengeschwindigkeit c_s nimmt mit der Tiefe bzw. mit der Überlagerungsspannung zu. Ebenso steigt die Scherwellengeschwindigkeit mit der Lagerungsdichte an. Für die maßgebliche Tiefe des Modellversuchsstandes für die Serie 1 von 1,20 m, ergibt sich hieraus für den wassergesättigten Modellsand eine Scherwellengeschwindigkeit für eine Lagerungsdichte von 12 % bis 80 % von 93 m/s bis 109 m/s. Der qualitative Verlauf der Druckwellengeschwindigkeit c_p (Gleichung 4.7) und die Abhängigkeit vom Spannungszustand und der Lagerungsdichte sind analog zur Scherwellengeschwindigkeit. Für die maßgebliche Tiefe und den o.g. Bereich der Lagerungsdichte beträgt die Druckwellengeschwindigkeit 173 m/s bis 203 m/s. Die Scherwellen- und Druckwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes sind in Bild 4.4 dargestellt.

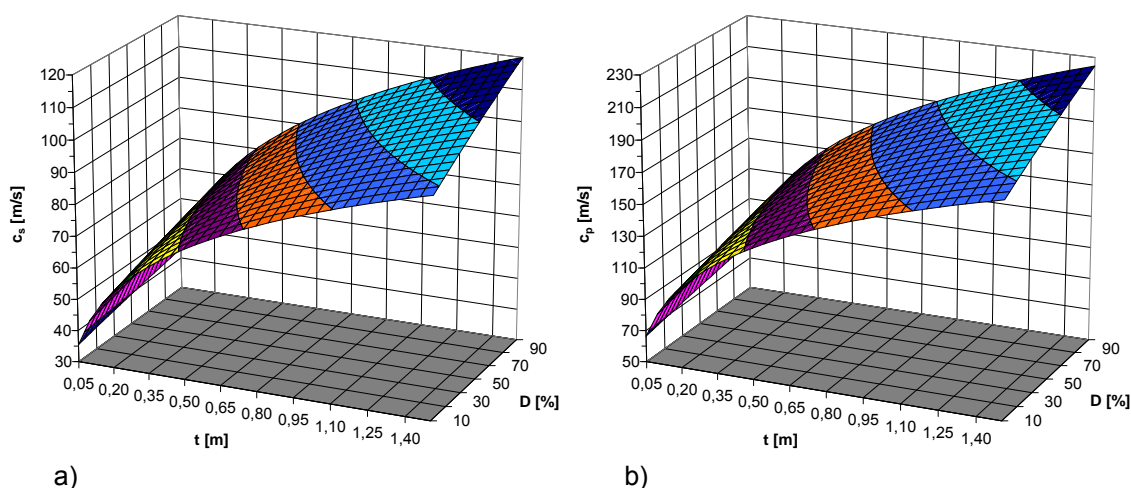


Bild 4.4: Scherwellen- und Druckwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes

Amplitude der Rüttlerschwingung und Schubverzerrung:

Die Abschätzung einer mittleren Schubverzerrung von 10^{-4} liefert unter Berücksichtigung der Materialdämpfung und der Abminderung des Schubmoduls die Amplitude der Rüttlerschwingung. Für das Beispiel $f = 45$ Hz und $m_u = 500$ g ist die Rüttleramplitude und die daraus resultierende Schubverzerrung gemäß Gleichung 4.10 in Bild 4.5 dargestellt.

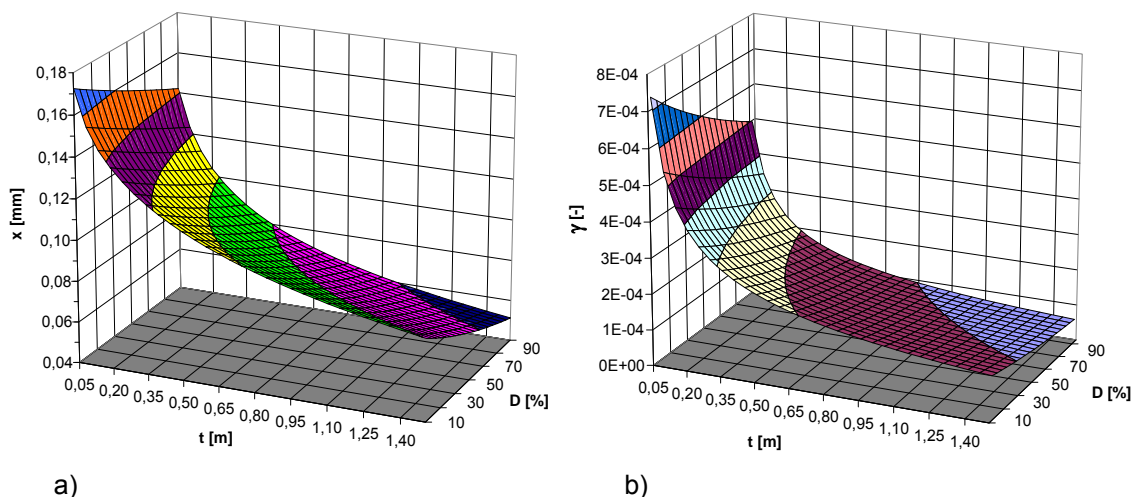


Bild 4.5: Amplitude der Rüttlerschwingung und die Schubverzerrung in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes, für $f = 45$ Hz, $m_u = 500$ g

Die Rüttleramplitude nimmt mit der Tiefe und zunehmender Lagerungsdichte ab. Analog stellt sich der Verlauf der Schubverzerrung dar. Für das dargestellte Berechnungsbeispiel wird die angenommene Schubverzerrung für die maßgebliche Tiefe von 1,20 m bestätigt.

Modellparameter Steifigkeit k und Dämpfung c :

Für das Fundamentmodell werden die Steifigkeit und die Dämpfung für die Verschiebung des Ersatzsystems gemäß Gleichung 4.15 und 4.16 berechnet. Die Berechnungsergebnisse für das Beispiel 45 Hz / 500 g sind in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes in Bild 4.6 dargestellt. Sowohl die Steifigkeit als auch die Dämpfung nehmen mit der Tiefe und der Lagerungsdichte zu.

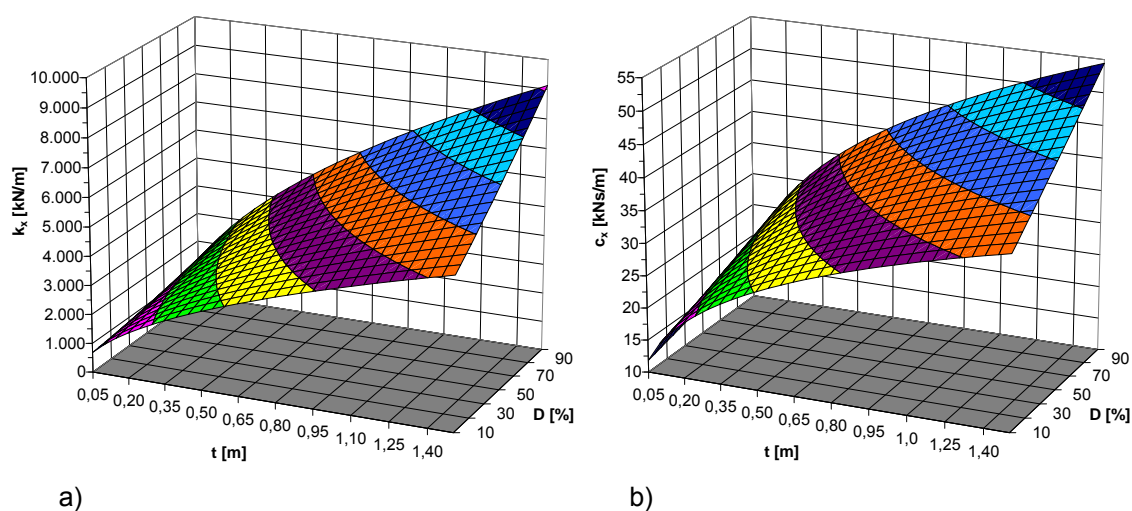


Bild 4.6: Modellparameter Steifigkeit und Dämpfung für die Rütterverschiebung in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes, für $f = 45$ Hz, $m_u = 500$ g

Systemeigenfrequenz und Vorlaufwinkel:

Für die Bewertung von Resonanzzuständen sind die Systemeigenfrequenz ω_0 und der Vorlaufwinkel φ wichtige Indikatoren. Mit der Zunahme der Steifigkeit steigt auch die Systemeigenfrequenz an (Gleichung 2.25). In der Darstellung der Systemeigenfrequenz in Bild 4.7, a ist die Rüttlerfrequenz des Berechnungsbeispiels von 45 Hz in einem Pfad gekennzeichnet.

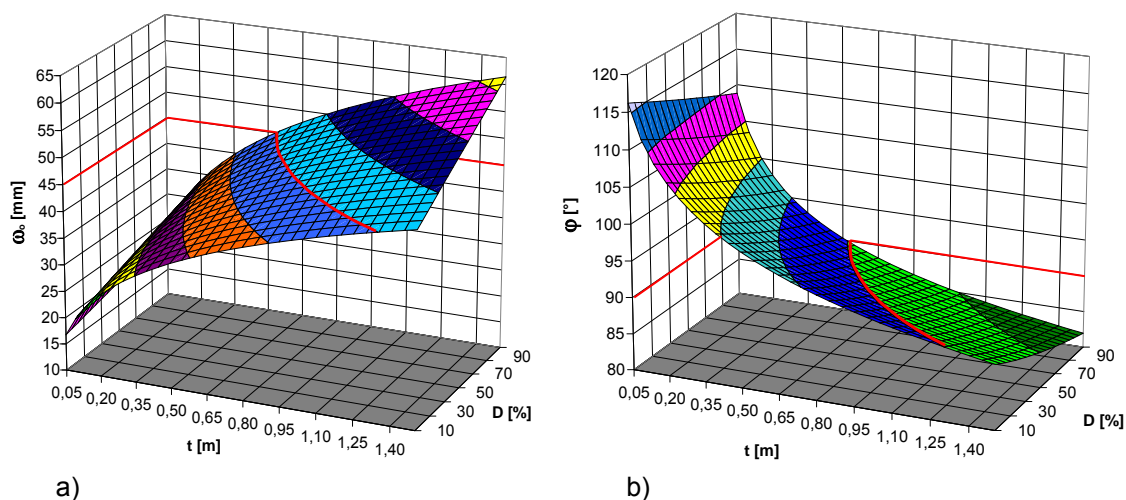


Bild 4.7: Eigenfrequenz des Ersatzsystems und der Vorlaufwinkel in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes, für $f = 45$ Hz, $m_u = 500$ g

Auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse ist bei einer unregelmäßigen und somit konstanten Rüttlerfrequenz nur bei diesen Rüttlertiefen und Lagerungsdichten eine Systemresonanz möglich. Je größer die Arbeitstiefe des Rüttlers, umso lockerer muss der Boden gelagert sein, damit die Kriterien für eine Systemresonanz erfüllt sind. Mit der Zunahme der Dämpfung (Bild 4.6, b) nimmt der Vorlaufwinkel ab (Bild 4.7, b). Das Berechnungsmodell liefert einen äquivalenten Zusammenhang für das Kriterium $\varphi = 90^\circ$ in Bezug auf Tiefe und Lagerungsdichte, wie die Übereinstimmung von Eigen- und Erregerfrequenz für $f = 45$ Hz (Bild 4.7, a). Zur Veranschaulichung ist die Systemeigenfrequenz $\omega_0 = 45$ Hz (entspricht der Rüttlerfrequenz des Berechnungsbeispiels) und die Einhaltung des Kriteriums $\varphi = 90^\circ$ in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte in Bild 4.8 dargestellt.

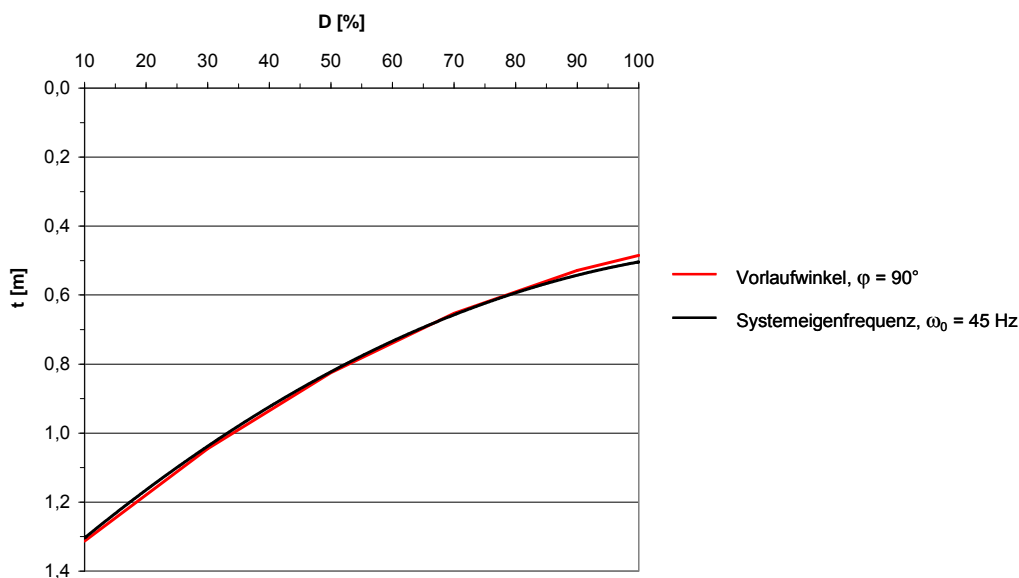


Bild 4.8: Eigenfrequenz des Rüttler-Boden-Systems $\omega_0 = 45$ Hz (= Erregerfrequenz) und Vorlaufwinkel $\varphi = 90^\circ$ in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes, für $m_u = 500$ g

In der Regelungstechnik werden als Steuerungsgrundlage Kennfelder verwendet. Diese stellen eine Größe in Abhängigkeit von zwei voneinander unabhängigen Einflussgrößen in einem dreidimensionalen orthogonalen Koordinatensystem dar. Auf der Grundlage der vorgestellten Berechnung ist die Bestimmung von Kennfeldern möglich, die als Steuerungsgrundlage für die Regelung des Rüttlerantriebes dienen können. Die verfahrenstechnisch einfachste Steuerungsgröße stellt in diesem Zusammenhang die Rüttlerfrequenz dar. In Abhängigkeit von der maschinentechnischen Realisierbarkeit, ist auch das Ein- oder Auskuppeln von Unwuchtmassen zur Effizienzsteigerung denkbar.

Bodenreaktionskraft:

Die Bodenreaktionskraft (Kapitel 2.3.2.4) ist gemäß Gleichung 2.49 und 2.50 von der Rüttleramplitude und den Modellparametern der Steifigkeit und Dämpfung der Systemverschiebung abhängig. Die Bodenreaktionskraft steigt mit der Rüttlertiefe an, ebenso bewirkt eine Zunahme der Lagerungsdichte des Bodens eine Erhöhung der Bodenreaktionskraft. Qualitativ ergibt sich ein inverser Verlauf zu der Rüttleramplitude (Bild 4.5, a). Der Maximalbetrag der Bodenreaktionskraft entspricht etwa der Rüttlerfliehkraft.

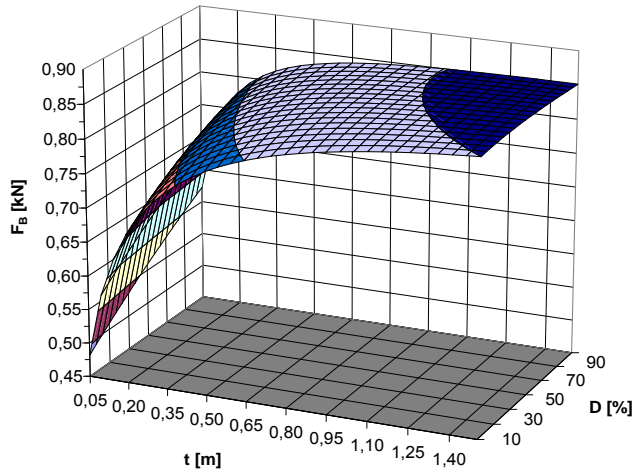


Bild 4.9: Bodenreaktionskraft in Abhängigkeit von der Tiefe und der Lagerungsdichte des Modellsandes, für $f = 45 \text{ Hz}$, $m_u = 500\text{g}$

4.3 Vergleich der analytischen Berechnungen mit den Ergebnissen der Modellversuche

4.3.1 Modellparameter Federsteifigkeit und Dämpfung

Im analytischen Ersatzsystem werden zwei entkoppelte Schwingungen betrachtet. Der Rüttler erfährt einerseits eine horizontale Verschiebung des Schwerpunktes x_s , andererseits findet eine Verdrehung ϑ um den Schwerpunkt statt. Die Gleichungen (2.26) bis (2.28) sowie (2.29) bis (2.31) sind die Lösungen der beiden unabhängigen Schwingbewegungen. Sie beinhalten die vier Modellkonstanten, die das Verhalten des Bodens als Feder-Dämpfer System beschreiben und werden auf der Grundlage der messtechnisch ermittelten Amplitude der Rüttlerschwingung und des Vorlaufwinkels berechnet. Das Auflösen nach den Konstanten c und k führt zu den Gleichungen für die Dämpfung und Federsteifigkeit der Rüttlerverschiebung

$$c = \frac{m_u \cdot r \cdot \Omega}{X_s} \cdot \cos \alpha_s, \quad (4.23)$$

$$k = \Omega^2 \cdot \left(\frac{m_u \cdot r}{X_s} \cdot \sin \alpha_s + m \right). \quad (4.24)$$

Für die Kippbewegung des Rüttlers ergibt sich für die Dämpfung c_g und Federsteifigkeit k_g

$$c_g = \frac{(z_F - z_S) \cdot m_u \cdot r \cdot \Omega}{\Theta} \cdot \cos \alpha_g, \quad (4.25)$$

$$k_g = \frac{(z_F - z_S) \cdot m_u \cdot r \cdot \Omega^2}{\Theta} \cdot \sin \alpha_g - m \cdot g \cdot z_S + J_{\Theta}^S \cdot \Omega^2. \quad (4.26)$$

In die Berechnung der Parameter nach (4.23) bis (4.26) gehen die Amplitude der Schwingung des Schwerpunkts X_S , der Winkel der maximalen Kippbewegung θ sowie die zugehörigen Phasenwinkel α_S und α_g ein. Unter der Voraussetzung, dass der Vorlaufwinkel der Rüttlerverschiebung dem der Rüttlerverdrehung entspricht (vgl. Kapitel 2.3.2.1) gilt:

$$\alpha_S = \alpha_g = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (4.27)$$

Damit die berechneten Modellparameter nur die Einflüsse dokumentieren, die durch den Boden während des Verdichtungsvorganges hervorgerufen werden, erfolgt eine Nullkalibrierung der Dämpfung und Steifigkeit für die Schwingung des Rüttlers in der Luft. Der Vorlaufwinkel wird hierbei auf einen Wert von 180° für die Schwingung in der Luft kalibriert. Daraus ergibt sich die Modellkonstante der Dämpfung des Rüttlers in der Luft zu Null. Für die Nullkalibrierung der Steifigkeit, erfolgt eine Anpassung der Masse des Gesamtsystems m und des Massenträgheitsmoments J_{Θ}^S . Darin wird die Masse der mitschwingenden Rüttlerhalterung und der Kranelemente so bestimmt, dass für die Rüttlerschwingung in der Luft die berechnete Federsteifigkeit zu Null wird.

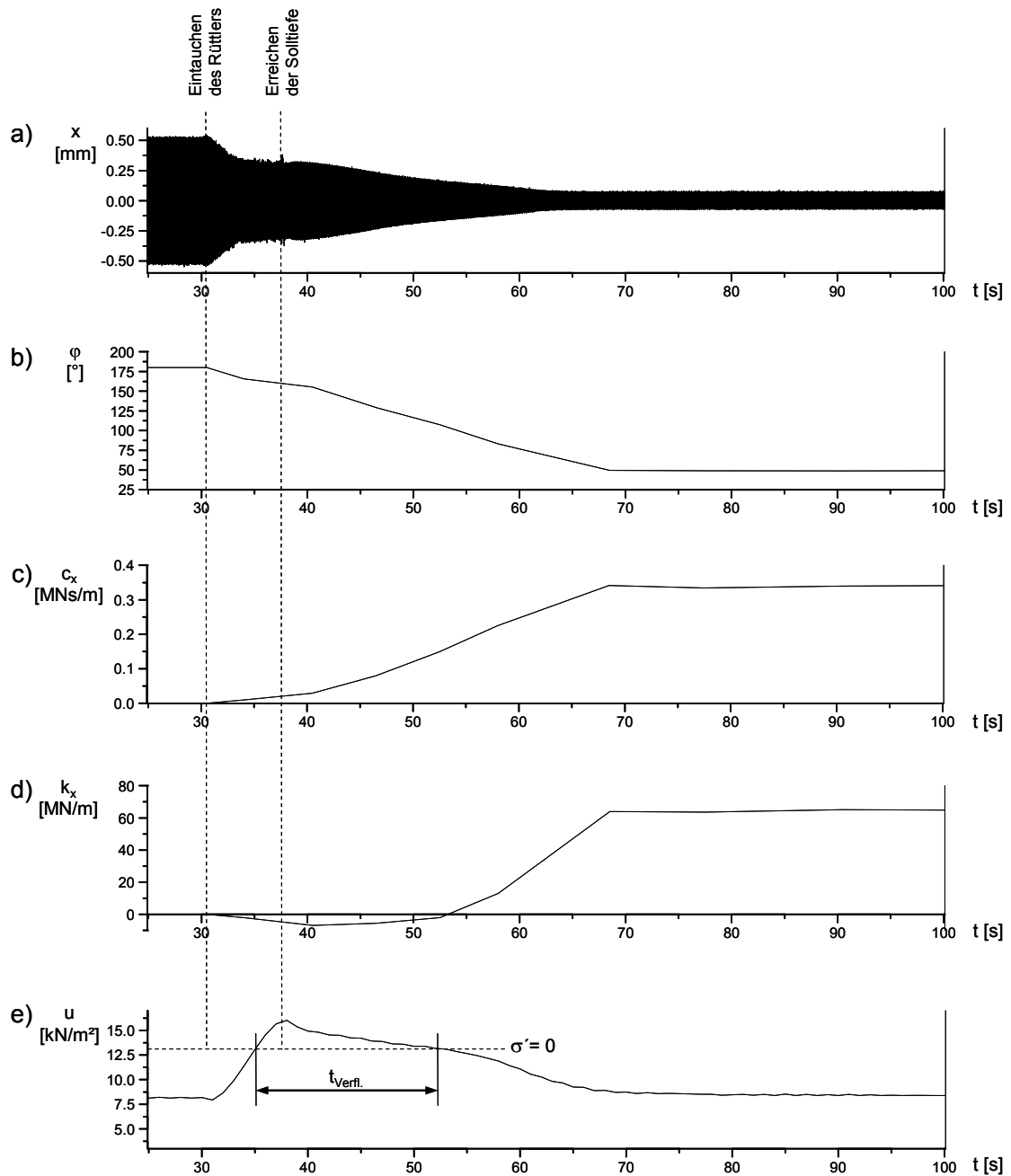


Bild 4.10: Charakteristische Messsignale und berechnete Modellparameter eines Verdichtungsversuches, Bsp.: 35 Hz - 750 g - $t = 1,0$ m

- a) Rüttleramplitude Messebene 1 / Rüttlerspitze
- b) Vorlaufwinkel
- c) Modellparameter Dämpfung der Verschiebung
- d) Modellparameter Steifigkeit der Verschiebung
- e) Porenwasserdruck Messebene 1 / Rüttlerspitze

Die Veränderung der Modellparameter Dämpfung und Federsteifigkeit während des Verdichtungsvorganges ist beispielhaft für den Versuch $f = 35$ Hz, $m_u = 750$ g, $t = 1,0$ m in Bild 4.10 dargestellt. Der Modellparameter der Dämpfung steigt mit der Zunahme der

Dichte des Modellsandes an (Bild 4.10, c). Gemäß Gleichung 4.23 ist dieser Modellparameter während eines Verdichtungsversuches von der Rüttleramplitude und dem Vorlaufwinkel abhängig. Alle weiteren Eingangsgrößen bleiben während des Versuches unverändert. Der Modellparameter der Dämpfung steigt mit der Dichtezunahme an und erreicht mit der Konstanz von Rüttleramplitude und Vorlaufwinkel seinen Endwert.

Während der Rüttlerabsenkung und zu Beginn der Bodenverdichtung wird für den Modellparameter der Federsteifigkeit ein negativer Wert ermittelt (Bild 4.10, d). In diesem Zeitintervall hat der Vorlaufwinkel einen Wert über 90° , woraus gemäß Gleichung 4.27 für α_s ein negatives Vorzeichen resultiert. Die berechnete negative Steifigkeit dokumentiert, dass das Rüttler-Boden-System in diesem Betriebszustand nicht korrekt durch ein Feder-Dämpfer-System abgebildet werden kann. Der negative Modellparameter beschreibt aber auch einen vollständigen Steifigkeitsverlust des anstehenden Bodens in einem Zeitintervall, das gut mit dem der Bodenverflüssigung aus der Porenwasserdruckmessung korreliert (Bild 4.10, e). Diese grundsätzliche Übereinstimmung zeigt sich bei allen Versuchen der Versuchsserie 2 mit Porenwasserdruckmessung. Diese Auswertung belegt, dass bei der Ermittlung einer negativen Steifigkeit des Ersatzsystems von einer Verflüssigung des umgebenen Bodens ausgegangen werden kann.

Die berechneten Modellparameter der Dämpfung und Steifigkeit der Rüttlerverschiebung der Versuchsserie 1 sind in Bild 4.11 zusammengefasst. Die berechnete Dämpfung c_x ist über den untersuchten Frequenzbereich für den stationären Zustand ($t = 500$ s) annähernd konstant. Dies gilt auch für die Rückrechnungsergebnisse der Federsteifigkeit des Ersatzmodells.

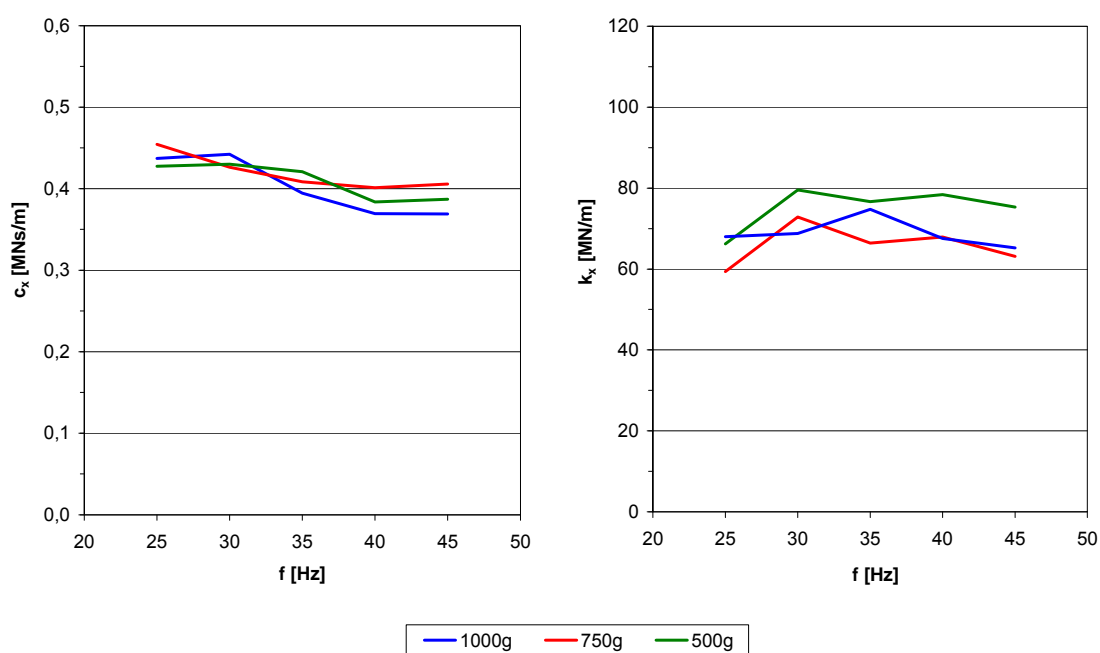


Bild 4.11: Dämpfung und Steifigkeit der Verschiebung nach $t = 500$ s für die Versuchsserie 1 in Abhängigkeit von der Rüttlerfrequenz

Auf der Grundlage der einzelnen rückgerechneten Modellparameter ist ein Rückschluss auf die Lagerungsdichte des anstehenden Bodens nicht möglich. In der Einzelbetrachtung kann damit lediglich zusätzlich zu der Auswertung der Rüttleramplitude und des Vorlaufwinkels der Fortschritt des Verdichtungsvorganges dokumentiert werden (Bild 4.10, c und d).

4.3.2 Rüttleramplitude und Lagerungsdichte

In die Berechnung der Rüttleramplitude gehen gemäß Gleichung 2.35 die vier Modellparameter der Rüttlerverschiebung und Verdrehung, als auch die Kennwerte des Rüttlers ein. Entsprechend dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Berechnungsablauf wurde für jeden Versuch in Abhängigkeit von der jeweiligen Schubverzerrung der Schubmodul abgemindert und die Materialdämpfung berücksichtigt. Die in diesem Zusammenhang ermittelten Werte zeigt Bild 4.12.

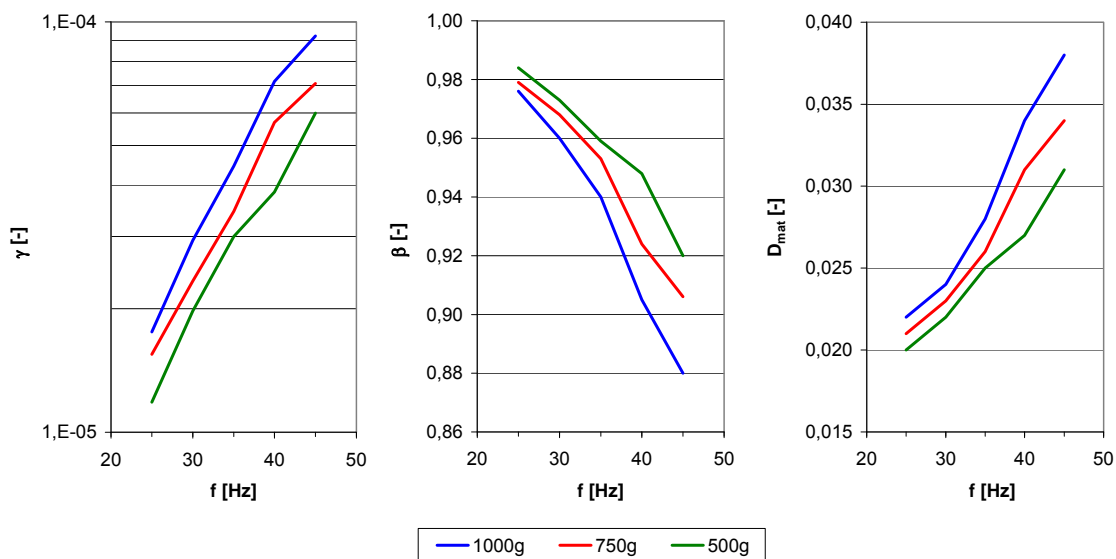


Bild 4.12: Schubverzerrung γ , Abminderungsfaktor des Schubmoduls β und Materialdämpfung D_{mat} für die Modellversuche Serie 1 für den stationären Zustand nach $t = 500$ s

Die berechneten Rüttleramplituden werden in Bild 4.13 in Bezug auf die im Versuch ermittelten Lagerungsdichten des Modellsandes dargestellt und den messtechnisch ermittelten Rüttleramplituden gegenübergestellt.

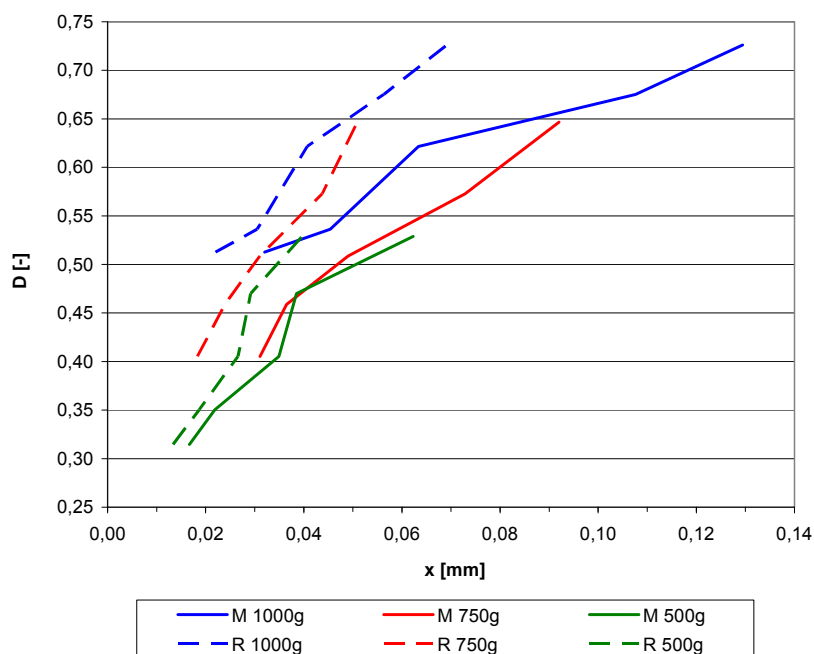


Bild 4.13: Zusammenhang zwischen der Amplitude der Rüttlerschwingung und der Lagerungsdichte für die Berechnung (R) und die Messergebnisse (M) der Modellversuche

Es wird deutlich, dass die analytischen Berechnungsergebnisse den Zusammenhang zwischen Amplitude und Lagerungsdichte qualitativ gut abbilden. Quantitativ werden die Rüttleramplituden durch das Berechnungsmodell unterschätzt. Ohne die Kenntnis der Sondierungsergebnisse würden die Lagerungsdichten des Bodens durch die Rückrechnung im Mittel um ca. 10 % - Lagerungsdichte (D) zu hoch bewertet.

Für die Bewertung der ermittelten Differenz zwischen den Mess- und Berechnungsergebnissen sind Vergleichsberechnungen und Parametervariationen durchgeführt worden. In den analytischen Berechnungsansatz (vgl. Kapitel 4.2.2) geht eine Vielzahl von Parametern ein, die sich im Rahmen der iterativen Berechnung gegenseitig beeinflussen. Es zeigt sich, dass insbesondere die gemäß Gleichung 4.10 ermittelte Schubverzerrung einen maßgeblichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis hat. Die Sensitivität dieses Parameters ist im Vergleich zu den weiteren Eingangsgrößen als hoch zu bewerten. Zudem ist die Ermittlung der Schubverzerrung gemäß o.g. Gleichung mit Unsicherheiten behaftet, da auf dieser Grundlage in Analogie zu einer Fundamentalschwingung nur eine Abschätzung der Schubverzerrung erfolgen kann. Bild 4.14 zeigt den Vergleich der errechneten Schubverzerrung (vgl. Bild 4.12) mit einer kalibrierten Schubverzerrung.

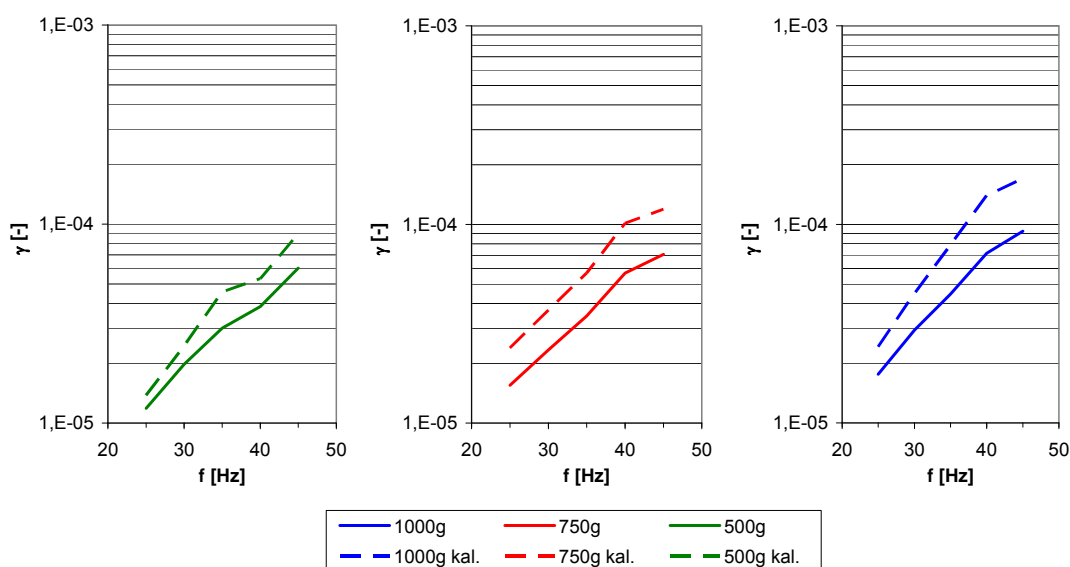


Bild 4.14: Vergleich der errechneten und der an den Versuchsergebnissen kalibrierten Schubverzerrung in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz des Modellrüttlers

Die kalibrierte Schubverzerrung wurde mit der Vorgabe der Übereinstimmung von Mess- und Versuchsergebnis zurückgerechnet. Hierbei zeigt sich ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der Schubverzerrung und der Erregerfrequenz des Rüttlers, für den hier betrachteten stationären Schwingvorgang des Rüttlers. Mit dem Berechnungsansatz gemäß Gleichung 4.10 wird die Schubverzerrung unterschätzt.

Für die Anpassung des Berechnungsmodells an die Ergebnisse der Modellversuche wurde auf dieser Grundlage ein dimensionsloser Kalibrierfaktor n_{kal} wie folgt eingeführt:

$$n_{\text{kal}} = \frac{\gamma_{\text{kal}}}{\gamma} \quad [-] . \quad (4.28)$$

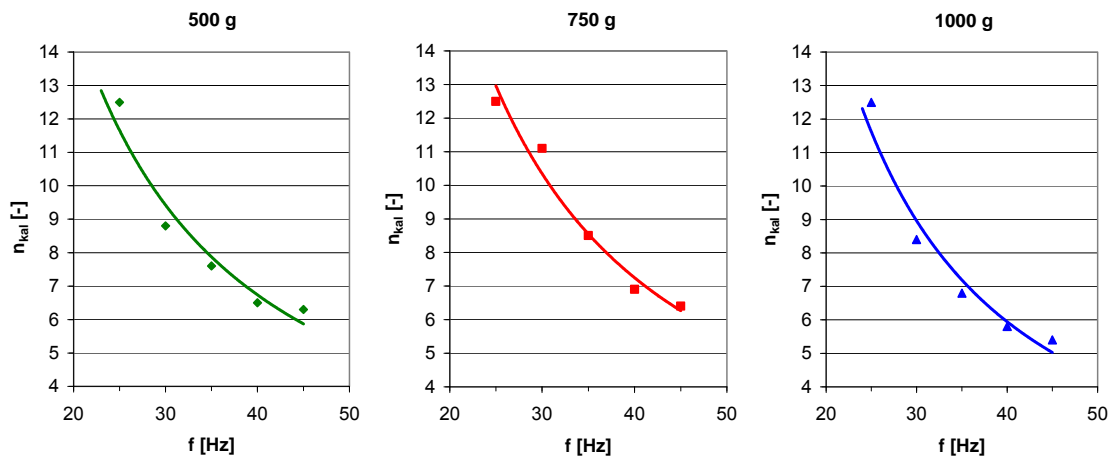


Bild 4.15: Dimensionsloser Kalibrierfaktor in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz des Tiefenrüttlers und der Unwuchtmasse

Wird die Kalibrierung der Schubverzerrung für die jeweilige Unwuchtmasse auf die Rückrechnung der Modellversuche angewendet, so ist eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnungs- und Messergebnis zu erzielen (Bild 4.16).

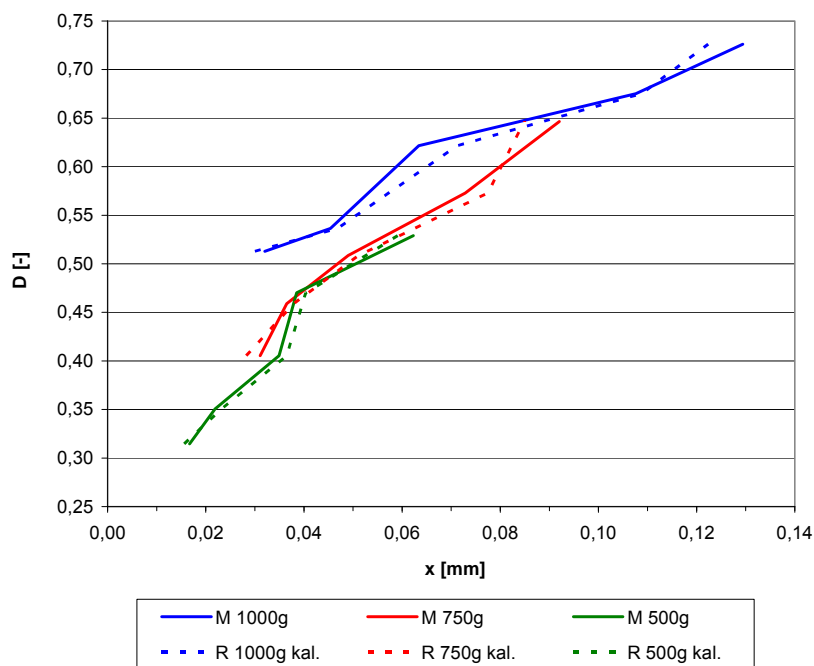


Bild 4.16: Vergleich der kalibrierten Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen

Es wird gezeigt, dass eine quantitative Abschätzung der erzielten Lagerungsdichte durch eine Rückrechnung mit dem kalibrierten Berechnungsmodell grundsätzlich möglich ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die im Rahmen dieser Untersuchung ermittelte Kalibrierung nur für die Randbedingungen des Modellversuchsstandes und den Modelltiefenrüttler gültig ist. Für Verdichtungsmaßnahmen in situ ist eine standort- und gerätespezifische Kalibrierung des Berechnungsmodells mittels eines Probefeldes erforderlich.

4.3.3 Indikatordiagramm für den Tiefenrüttler

Die Schwingung des Tiefenrüttlers ruft in dem umgebenen Boden eine Reaktionskraft hervor. Die Größe dieser Bodenreaktionskraft ist abhängig von der Rüttleramplitude und den Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des anstehenden Bodens (Kapitel 2.3.2.4). Für die Auswertung der Interaktion zwischen Rüttlerbewegung und den nicht konstanten Bodeneigenschaften während des Verdichtungsvorganges, erfolgt die Betrachtung beispielhaft für eine Belastungsrichtung (x-Richtung) am Rüttlerfuß (Bild 4.17).

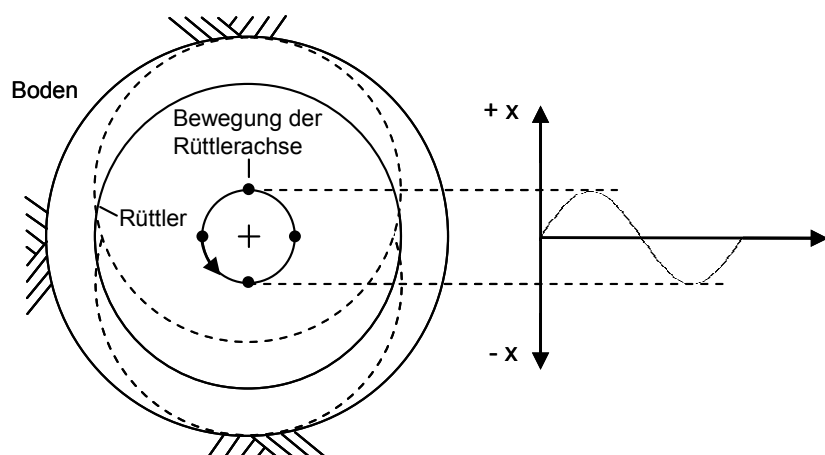


Bild 4.17: Schematische Darstellung der Bewegung des Modellrüttlers im Ringraum für die betrachtete x-Richtung

Wird die Bodenkraft über den Schwingweg aufgetragen, so entsteht ein Kraft-Weg-Diagramm, in welchem Steifigkeits- und Energiebetrachtungen des zu verdichtenden Bodens durchgeführt werden können. In Bild 4.18 sind die Kraft-Weg-Diagramme für unterschiedliche Zeitpunkte eines exemplarischen Verdichtungsversuches dargestellt. Der Boden erfährt bei jeder Umdrehung der Unwuchtmasse des Tiefenrüttlers eine Kompression und Extension an den jeweils gegenüberliegenden Seiten des Rüttler-ringraums. Da Kompression und Extension nicht auf einer Linie liegen, gibt der Tiefenrüttler Energie an den Boden ab, die im Diagramm durch die eingeschlossene Fläche zwischen Kompression und Extension beschrieben wird. In Analogie zu der Auswertung eines dynamischen Triaxialversuches (Kapitel 2.3.1.2.1 / Bild 2.11), beschreibt die eingeschlossene Fläche die dissipierte Energie ΔW infolge der Materialdämpfung. Im Zuge des Verdichtungsvorganges wird die Amplitude der Rüttlerschwingung durch den Steifigkeitszuwachs des umgebenen Bodens reduziert und die Materialdämpfung nimmt ab. Diese Ergebnisauswertung ist plausibel, da sie den in Bild 4.1 dargestellten Zusammenhang zwischen Materialdämpfung und aufgeprägter Verformung abbildet.

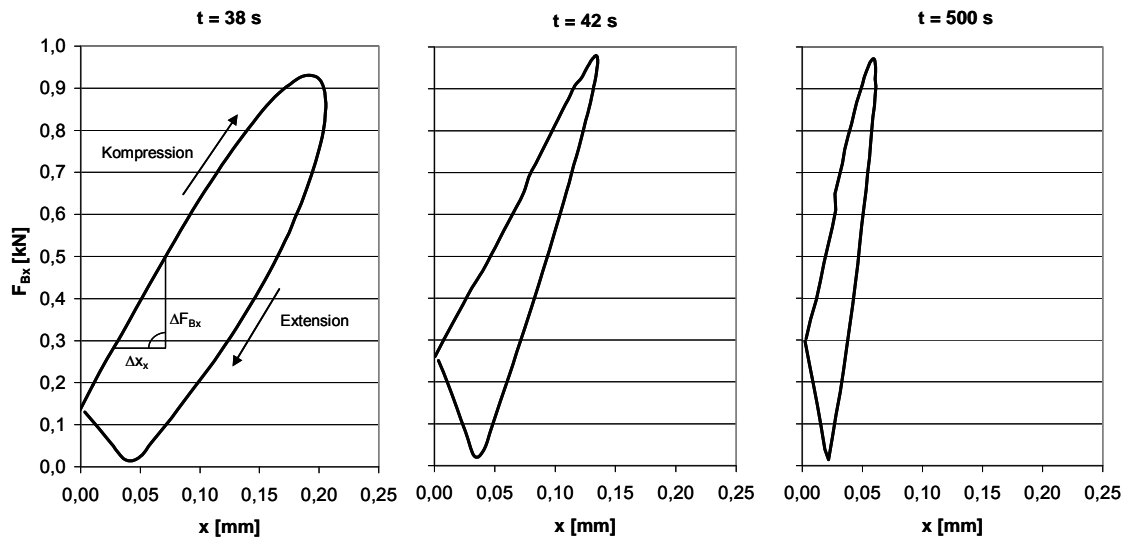


Bild 4.18: Darstellung der Bodenreaktionskraft in Abhängigkeit des Schwingweges des Modellrüttlers in x-Richtung im Indikator diagramm am Beispiel des Verdichtungsversuchs $f=35\text{Hz}$, $m_u=1000\text{g}$, $t=1,20\text{m}$

Mittels der Steigung des Kompressionspfades kann auf die dynamische Federsteifigkeit des Bodens geschlossen werden. Aus einer ansteigenden Federsteifigkeit resultiert ein größerer Energietransport vom Rüttlerkörper in den zu verdichtenden Boden. Die Darstellung im Indikator diagramm verdeutlicht den Anstieg der Federsteifigkeit während des Verdichtungsvorganges. In Anlehnung an die dynamische Verdichtungskontrolle bei der Verwendung von Vibrationswalzen (KRÖBER, 1988) kann für den Tiefrüttler ein dynamische Steifigkeit E_{dyn} als Tangentenmodul formuliert werden:

$$E_{\text{dyn}} = \frac{\Delta F_B}{\Delta x} \quad [\text{MN/m}^2] . \quad (4.29)$$

Die Auswertung der Kraft-Weg-Beziehung liefert für den in Bild 4.18 dargestellten Verdichtungsversuch nach einer Verdichtungszeit von 500 Sekunden einen dynamischen E-Modul von ca. 250 MN/m^2 . Durch die Rammsondierung wurde für diesen Versuch eine Lagerungsdichte von $D = 0,62$ ermittelt. Dies entspricht einer dichten Lagerung. Der ermittelte dynamische E-Modul kann im Vergleich mit Literaturwerten (KLEIN, 2001) als plausibel bewertet werden.

4.3.4 Bewertung von Systemresonanzen im Rüttler-Boden-System

Um bei der Ausführung des Rütteldruckverfahrens gezielt Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System herbeiführen zu können, ist die Kenntnis darüber erforderlich, in welchen Betriebstiefen und bei welchen Frequenz-Unwucht-Kombinationen sich ein Vorlaufwinkel von 90° einstellt. Auf dieser Grundlage kann eine aktive Anpassung der Betriebsparameter erfolgen. Mit dem kalibrierten Berechnungsmodell wurden die Kennlinien für das Resonanzkriterium $\varphi = 90^\circ$ in Abhängigkeit von der Betriebstiefe des Rüttlers und der Lagerungsdichte des Bodens bestimmt. Die Berechnungs- und Messergebnisse sind in Bild 4.19 für eine Unwuchtmasse des Modellrüttlers von 750 g dargestellt.

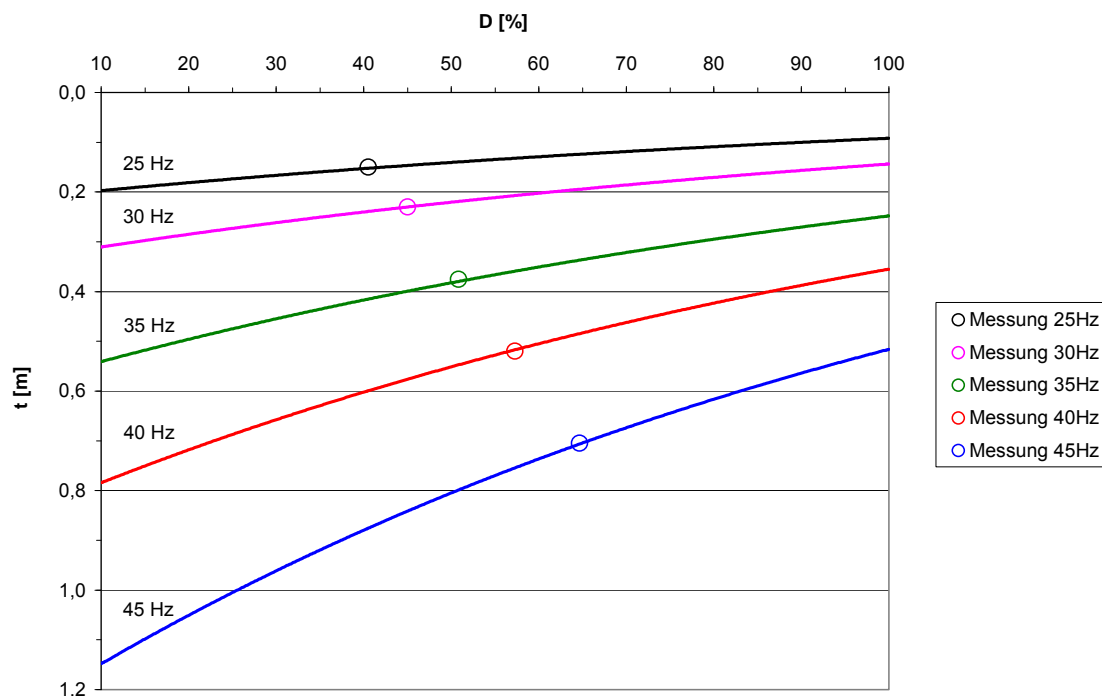


Bild 4.19: Resonanzfrequenzen des Rüttler-Boden-Systems in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte D und der Tiefe t für eine Unwuchtmasse von 750 g

Die Auswertung zeigt, dass mit zunehmender Tiefe die Lagerungsdichte umso geringer und die Rüttlerfrequenz umso höher sein muss, damit sich eine Systemresonanz einstellen kann. Mit der Zunahme der Lagerungsdichte während des Verdichtungs Vorganges, muss dem zu Folge die Rüttlerfrequenz erhöht werden, um den Resonanzzustand aufrecht zu erhalten. Bei größeren Tiefen wird deshalb die mögliche Dauer der Verdichtung im resonanznahen Bereich von der maximalen Frequenz des Tiefenrüttlers

begrenzt. In Bild 4.20 ist exemplarisch für eine Tiefe des Modellrüttlers von 0,60 m das Intervall der erforderlichen Frequenzanpassung zur Aufrechterhaltung eines Vorlaufwinkels von 90° während des Verdichtungsvorganges dargestellt. Um eine dichte Lagerung ($D = 80\%$) zu erreichen, ist eine Erhöhung der Rüttlerfrequenz von 36 Hz auf ca. 45 Hz erforderlich. Die berechnete Frequenzkennlinie ist linear. Sensitivitätsuntersuchungen in Form von Parametervariationen des Berechnungsmodells haben gezeigt, dass die Unwuchtmasse des Modellrüttlers einen geringen Einfluss auf den Vorlaufwinkel und somit auf das Resonanzkriterium $\varphi = 90^\circ$ hat.

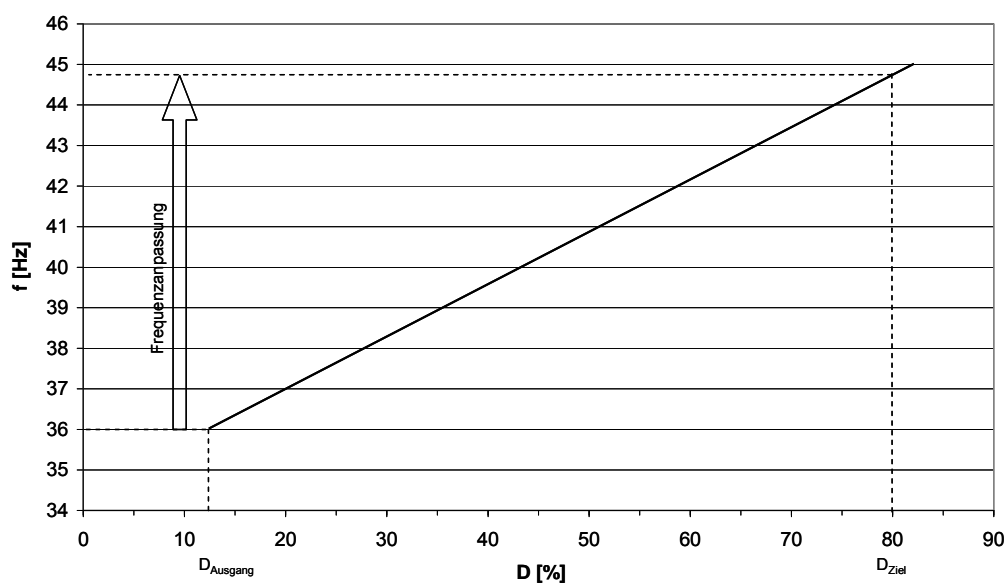


Bild 4.20: Erforderliche Anpassung der Rüttlerfrequenz für die Aufrechterhaltung des Resonanzzustandes während des Verdichtungsvorganges, für $t = 0,60$ m und $m_u = 750$ g

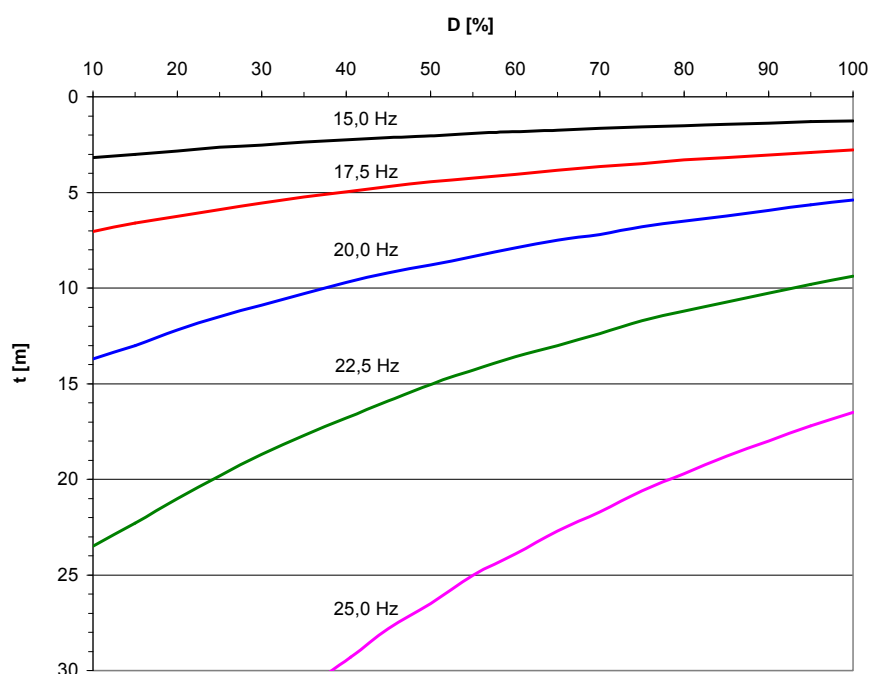
4.4 Vergleichsberechnung für einen Tiefenrüttler in situ

Für die Bewertung des analytischen Berechnungsmodells in Bezug auf die Abbildung der in situ Ausführung der Rütteldruckverdichtung sind Vergleichsberechnungen für einen Tiefenrüttler der Keller Grundbau GmbH vom Typ S 300 durchgeführt worden. Die maschinentechnischen Kennwerte dieses Rüttlers sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Kennwerte für den Tiefenrüttler Typ S 300 der Keller Grundbau GmbH

m [kg]	$m_u \times r_u$ [kgm]	f [Hz]	F [kN]	$\varnothing D$ [m]	z_F [m]	z_s [m]	l [m]
2.110	8,39	30	298	0,41	2,158	1,385	2,747

Die Vergleichsberechnungen wurden mit den Kennwerten des wassergesättigten Sandbodens, analog zu dem Boden der Modellversuche (Kapitel 3.3.3) durchgeführt. Die Resonanzfrequenzen des Rüttler-Boden-Systems wurden für das Kriterium $\varphi = 90^\circ$ in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Tiefe für den Rüttler S300 berechnet. Qualitativ wurde ein vergleichbarer Zusammenhang entsprechend den Modellversuchen ermittelt (Bild 4.21).

Bild 4.21: Resonanzfrequenzen des Rüttler-Boden-Systems in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte D und der Tiefe t für den Tiefenrüttler S 300

Die Berechnungen ergeben im Vergleich zum Modellmaßstab deutlich niedrigere Systemeigenfrequenzen. Dies ist auf die sehr viel größerer Masse des S 300-Rüttlers zurückzuführen, da gemäß Gleichung 2.25 die Systemeigenfrequenz aus dem Quotienten von Steifigkeit und Rüttlermasse bestimmt wird. Auf der Grundlage der Berechnungen ergeben sich für die maßgeblichen Produktionstiefen des Rütteldruckverfahrens von 10 m bis 25 m Eigenfrequenzen des Rüttler-Boden-Systems in Abhängigkeit von

der Lagerungsdichte zwischen 17 Hz und 30 Hz. Für den wassergesättigten Sand wurden für die Betriebstiefen von 10 m bis 25 m Frequenzkennlinien zur Aufrechterhaltung des Resonanzzustandes mit der zunehmenden Lagerungsdichte während des Verdichtungsvorganges berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 4.22 dargestellt.

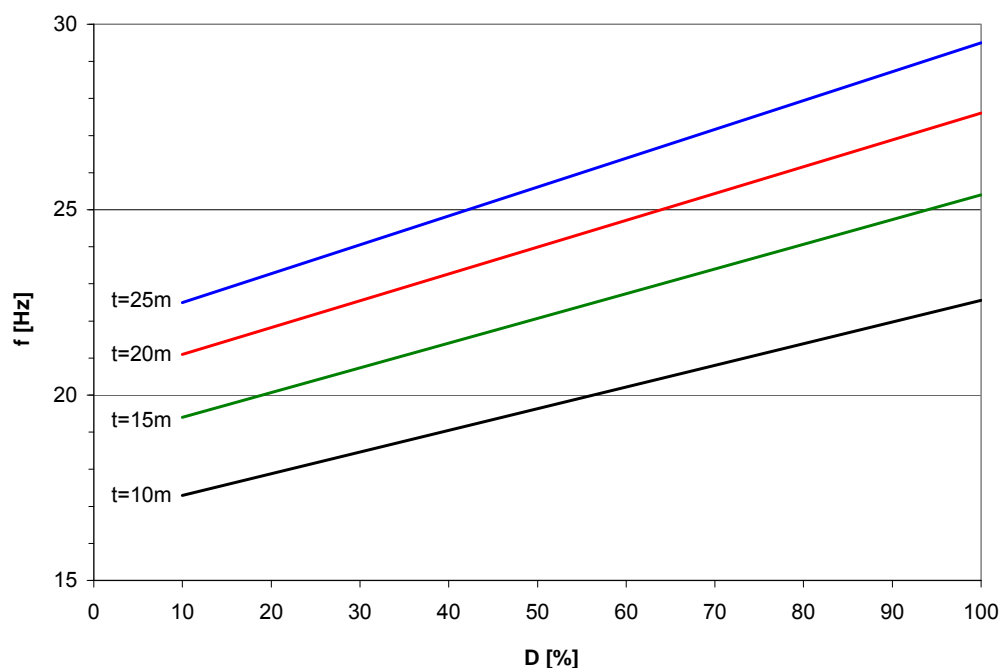


Bild 4.22: Frequenzkennlinien für die Aufrechterhaltung des Resonanzzustandes während des Verdichtungsvorganges in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Betriebstiefe

Entsprechend der vorangehend beschriebenen Berechnungen für die Modellversuche, sind auch die Frequenzkennlinien für den Rüttler S 300 linear. Je größer die Betriebstiefe des Rüttlers ist, umso höher ist die Systemeigenfrequenz. Der hier ermittelte Frequenzbereich von 17 Hz bis 30 Hz wird von den meisten modernen Tiefenrüttlern ohne Probleme erreicht, so dass mit einer kennfeldgesteuerten Mess- und Regelungstechnik eine kontinuierliche Verdichtung im resonanznahen Bereich realisierbar ist.

Es ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass die Eigenfrequenz des Rüttler-Boden-Systems stark von den dynamischen Eigenschaften des anstehenden Bodens beeinflusst wird. Vergleichsberechnungen für einen nicht wassergesättigten Sand haben gezeigt, dass allein die Reduktion der Wassersättigung eine Erhöhung der Systemeigenfrequenz von i. M. 5 Hz bewirkt.

4.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Ergebnisse und Bewertungen der analytischen Berechnungen werden wie folgt zusammengefasst:

- Im Rahmen von Vergleichsberechnungen wurde untersucht, in wie fern die Rüttler-Boden-Interaktion bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens durch ein analytisches Berechnungsmodell in Analogie zu einer Fundamentalschwingung beschrieben werden kann. Die Berechnungsergebnisse belegen, dass die durchgeführten Verdichtungsversuche mit einem Modelltiefenrüttler qualitativ gut abgebildet werden können. Auf dieser Grundlage wurden Prognoseberechnungen durchgeführt, die für den unregelmäßigen Tiefenrüttler zur Festlegung von Rüttlerfrequenzen und Unwuchtmassen dienen können.
- Eine direkte Rückrechnung der erzielten Lagerungsdichte gelingt trotz Kenntnis der bodendynamischen Kennwerte nur mit signifikanten Differenzen zu den gemessenen Lagerungsdichten der Modellversuche. Wird das Berechnungsmodell jedoch an Messergebnissen kalibriert, so kann mit der Kenntnis der Rüttlerschwingung im Boden und des Vorlaufwinkels auch eine quantitative Abschätzung der Lagerungsdichte erfolgen. Voraussetzung hierfür sind gleichbleibende bodenmechanische und dynamische Randbedingungen.
- Die Verwendung eines Bodenkraft-Weg-Diagramms dokumentiert anschaulich den Steifigkeitsanstieg des Bodens während der Verdichtung und die Abnahme der Materialdämpfung infolge der verdichtungsbedingten Reduzierung der Rüttlerschwingung. Auf der Grundlage dieser Auswertung kann eine Abschätzung des dynamischen E-Moduls erfolgen.
- Das Berechnungsmodell kann ferner dazu verwendet werden, Resonanzzustände im Rüttler-Boden-System zu bewerten. Im Rahmen von Vergleichsberechnungen wurde gezeigt, dass die erforderlichen Rüttlerfrequenzen für eine kontinuierliche Verdichtung im resonanznahen Bereich von modernen Tiefenrüttlern erreicht werden. Das kalibrierte Modell eignet sich gut als Berechnungsgrundlage für eine aktive Regelungstechnik zur Aufrechterhaltung der Systemresonanz während des Verdichtungsvorganges. Eine Vorgehensweise zur Bestimmung von tiefenabhängigen Frequenzkennlinien wurde aufgezeigt.

5 Zusammenfassung

Bei der dynamischen Tiefenverdichtung durch das Rütteldruckverfahren werden die erzielte Dichteerhöhung im Boden und der Wirkungsradius des Tiefenrüttlers von einer Vielzahl von Maschinen- und Bodenparametern beeinflusst. Heute erfolgt in der Ausführung die Festlegung der Produktionsparameter wie z.B. die Rüttlerfrequenz, Unwuchtmasse oder das Verdichtungsrastraster weitestgehend auf empirischer Basis. Es wird vereinfachend mit einer konstanten Rüttlerfrequenz gearbeitet, auch wenn hierdurch nicht immer ein optimaler Verdichtungserfolg gewährleistet werden kann.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zur Schließung der Kenntnislücke in Bezug auf die Interaktion zwischen Tiefenrüttler und Boden während des Verdichtungs Vorganges geleistet. Mittels großmaßstäblicher Modellversuche wurden die Verdichtungsmechanismen untersucht. Mit einem messtechnisch instrumentierten Modelltiefenrüttler sind in einem schachtförmigen Versuchsstand Verdichtungsversuche durchgeführt worden. Als Modellboden diente ein wassergesättigter Mittelsand. In den Versuchsserien wurden die verfahrens- und gerätetechnischen Parameter Rüttlerfrequenz, Unwuchtmasse und Rüttlereintauchtiefe variiert und deren Einfluss auf die Größe und die räumliche Ausbildung der Bodenverdichtung bewertet. Darüber hinaus wurden die bodendynamischen Mechanismen der Bodenverflüssigung und der Resonanz im Rüttler-Boden-System in den Modellversuchen untersucht.

Es zeigt sich, dass mit dem Dichte- und Steifigkeitszuwachs des Modellsandes während des Verdichtungs Vorganges die Amplitude der Rüttlerschwingung auf einen konstanten Wert abnimmt, sobald sich ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Das Erreichen der Amplitudenkonstanz wird für die untersuchten Frequenz-Unwucht-Kombinationen von der Anzahl der Belastungszyklen bestimmt. Darüber hinaus wurde die erzielte Verdichtungsreichweite in dem wassergesättigten Modellsand untersucht. Bei gleicher Fliehkraft erzeugt eine große Unwucht mit einer niedrigen Frequenz eine höhere Dichte im Nahbereich des Rüttlers, während eine größere Verdichtungsreichweite mit einer kleinen Unwuchtmasse und einer hohen Rüttlerfrequenz erzielt wird. Bei allen Verdichtungsversuchen mit Porenwasserdruckmessung wurde im Nahbereich des Modellrüttlers für den wassergesättigten Modellsand eine Bodenverflüssigung nachgewiesen. Der Porenwasserdruck steigt unabhängig von der Rüttlerfliehkraft bis zu einem Grenzwert, der vom Überlagerungsdruck bestimmt wird.

In den Modellversuchen haben sich im Rüttler-Boden-System Resonanzerscheinungen in unterschiedlicher Weise dargestellt. Die Resonanzerscheinungen können durch das Vorseilen der Unwuchtmasse vor der Rüttlerbewegung um einen Vorlaufwinkel von 90° identifiziert werden. Für diesen Fall stellt sich nicht grundsätzlich eine Vergrößerung der Rüttlerschwingung ein. Durch die Auswertung der Schwingungsübertragung auf den Versuchsschacht konnten auch Resonanzerscheinungen im Modellsand ohne direkte Amplitudenvergrößerung am Modellrüttler nachgewiesen werden.

Aufbauend auf dem versuchstechnischen Teil dieser Arbeit, sind mit einem analytischen Berechnungsmodell Rückrechnungen der Ergebnisse der Modellversuche und Vergleichsberechnungen für einen in situ Tiefenrüttler durchgeführt worden. Die Berechnungsergebnisse belegen, dass die durchgeführten Verdichtungsversuche mit einem Modelltiefenrüttler qualitativ gut abgebildet werden können. Wird das Berechnungsmodell an Messergebnissen kalibriert, so kann mit der Kenntnis der Rüttlerschwingung und des Vorlaufwinkels auch eine quantitative Abschätzung der Lagerungsdichte des verdichteten Bodens erfolgen. Das Berechnungsmodell kann ferner dazu verwendet werden, Resonanzzustände im Rüttler-Boden-System zu bewerten. Eine Vorgehensweise zur Bestimmung von tiefenabhängigen Frequenzkennlinien zur Aufrechterhaltung der Systemresonanz während des Verdichtungsvorganges wurde aufgezeigt.

Die verwendete Messtechnik zur Erfassung der Rüttlerbewegung und des Vorlaufwinkels stellt ein zweckmäßiges Instrument für die Bewertung des Verdichtungsvorganges bei der Rütteldruckverdichtung dar und kann in Kombination mit dem kalibrierten Berechnungsmodell als Grundlage für eine aktive Mess- und Regelungstechnik zur Optimierung und Effizienzsteigerung des Verfahrens dienen.

6 Ausblick

An die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Modellversuche zu den Mechanismen der Rütteldruckverdichtung, sollte in der Form von in situ Untersuchungen angeknüpft werden:

- Durch die Herstellung eines regelungstechnischen Bindeglieds zwischen Mess-technik und Berechnungsmodell kann eine aktive Frequenzanpassung des Tie-fenrüttlers ermöglicht werden. Hiermit ist eine gesteuerte und kontinuierliche Verdichtung im resonanznahen Bereich möglich. Die quantitative Bewertung der Effizienzsteigerung kann durch einen Vergleich mit einer fliehkraftgleichen Verdichtung ohne die aktive Annäherung an die Systemresonanz erfolgen.
- Die Möglichkeit der Bestimmung der Lagerungsdichte des verdichteten Bodens durch analytische Rückrechnung am kalibrierten Berechnungsmodell sollte an-hand von Probefeldern mit redundanten Dichtemesssystemen bewertet werden. Werden die Messgrößen Rüttlerschwingung und Vorlaufwinkel erfasst, ist eine Implementierung einer durch Rückrechnung ermittelten Lagerungsdichte in ein Online-Qualitätssicherungssystem denkbar.
- Die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse der Modellversuche in Be-zug auf die Verdichtungsreichweite bei unterschiedlichen Frequenz-Unwucht-Kombinationen sollte ebenfalls durch in situ Probefelder validiert werden.

7 Literatur

Adam (1996)

Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen, Dissatation TU Wien, Institut für Grundbau und Bodenmechanik; 1996

Anderegg (2000)

Die automatische Verdichtung und Verdichtungskontrolle auf Asphalt und im Erdbau, Strassen- und Tiefbau, Heft 1; 2000

Bauer (2004)

Rütteldruck-/Rüttelstopfverdichtung - Rüttelortbetonsäulen; Bauer Spezialtiefbau GmbH, 2004
http://www.bauer-ag.com/dt/spezialtiefbau/bauverfahren/pdf/Tiefenruettel_Verfahren.pdf

Baxter, C.D.P. (1999)

An experimental study on the aging of sands, Dissertation submitted to the Fakultý of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Blacksburg, Virginia; 1999

Bolt B. A. (1984)

Erdbeben; Springer Verlag, Berlin; 1984

Brown R. (1977)

Vibroflotation Compaction of Cohesionless Soils; Journal of the Geotechnical Engineering Division; 1977

D'Appolonia E. (1953)

Loose Sands – Their Compaction by Vibroflotation; American Society for Testing Materials, Special Technical Publication No. 156; 1953

Das B. (1983)

Fundamentals of soil dynamics; Elsevier Science Publishing; 1983

DGGT (2002)

Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT); Berlin; 2002

Fellin W. (2000)

Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem; Institut für Geotechnik und Tunnelbau, Universität Innsbruck; Balkema Publishers; Rotterdam; 2000

Fellin W. (2002)

On-line Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung, Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Messen in der Geotechnik, Heft Nr. 68; 2002

FGSV (1979)

Merkblatt für die Untergrundverbesserung durch Tiefenrüttler; Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Untergrund-Unterbau; Köln; 1979

Fischer F. (1975)

Die Verdichtung im Erdbau und bituminösen Straßenbau; Clark International Marketing S.A., Wiesbaden; 1975

Flesch R. (1986)

Schwingungen im Wohn- und Industriebau; in Deutsche Gesellschaft für Erdbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik; Publikation Nr.1: Ausbreitung von Erschütterungen im Boden und Bauwerk, Hannover; 1986

Floss R. (1986)

Die Bodenverdichtung im Verkehrswege-, Grund- und Dammbau; 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf; 2001

Floss R. (2001)

Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau; Band 1: Grundprinzipien der Vibrationsverdichtung, Verdichtung von Boden und Felsgestein, Verdichtung von Asphaltschichten, 2001

Gazetas G. (1991)

Foundation Vibration; in Foundation Engineering Handbook; Chapman & Hall, 2. Ausgabe; 1991

Gotschol A. (2002)

Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung; Diss., Schriftenreihe Geotechnik; Universität Kassel; 2002

Green R.A. (2001)

Energy-Based Evaluation and Remediation of Liquefiable Soils, Dissertation, Blacksburg Virginia; 2001

Greenwood D. (1972)

Bodenverbesserung durch Tiefenverdichtung, Baumaschine und Bautechnik – 19. Jahrgang, Heft 9; 1972

Groot M.B., Meijer P. (2004)

Wave induced liquefaction underneath gravity structures, Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomeny, Triantafyllidis (ed); 2004

Gudehus G. (1980)

Matrialverhalten von Sand, neuere Erkenntnisse, Bauingenieur 55; 1980

Hartung M. (1994)

Einflüsse der Herstellung auf die Pfahltragfähigkeit in Sand; Dissertation, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig; 1994

Hauger W., Schnell W., Gross D. (1986)

Technische Mechanik, Band 3: Kinetik, Korrigierter Nachdr., Springer Verlag, Berlin; 1986

Haupt W. (1986)

Bodendynamik – Grundlagen und Anwendung; Vieweg & Sohn, Braunschweig; 1986

Hertwig A., Früh G., Lorenz H. (1933)

Die Ermittlung der für das Bauwesen wichtigsten Eigenschaften des Bodens durch erzwungene Schwingungen, Verlag von Julius Springer, Berlin; 1933

Jänke S. (1968)

Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit nichtbindiger Erdstoffe, Baumaschine und Bautechnik 15; 1968

Jaky J. (1944)

The Coefficient of Earth Pressure at Rest; Journal of the Society of the Hungarian Architectural Engineers 21; 1944

Jessberger H. L., Güttler U. (1985)

Geotechnische Großzentrifuge Bochum – Modellversuche im erhöhten Schwerfeld, Bautechnik Jahrgang 1985, Heft 2, pp. 85 ff.; 1985

Keller Grundbau GmbH, Prospekt (2004)

Die Tiefenrüttelverfahren; Prospekt 10-02D; Keller Grundbau GmbH, Offenbach; 2004

Khosla V. K., Wu T. H. (1976)

Stress-Strain Behaviour of Sand, Journal of the Geotechnical Engineering Division GT4, 12079, S. 303-321; 1976

Kirsch (1993)

Baugrundverbesserung mit Tiefenrüttlern, aus: 40 Jahre Spezialtiefbau 1953 – 1993 Technische und rechtliche Entwicklungen, Werner Verlag, Düsseldorf; 1993

Kirsch F. (2004)

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen; Dissertation, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig; 2004

Kirsch K., Sondermann W. (2001)

Baugrundverbesserung; in Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren; Berlin; 2001

Klein G. (2001)

Bodendynamik und Erdbeben; in Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Berlin; 2001

Krüber W. (1988)

Untersuchungen der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Heft 11; 1988

KTA-Regel 2201.2 (1990)

Fassung 06/90, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 2: Baugrund; 1990

Lorenz H. (1960)

Grundbau-Dynamik; Springer-Verlag; 1960

Mallet Ch., Pacquant J. (1954)

Erdstaudämme, Berlin; 1954

Makris N., Gazetas G. (1993)

Displacement phase differences in a harmonically oscillating pile, Geotechnique 43; 1993

Martin G. R., Finn W. D., Seed H. B. (1975)

Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, GT5, 11284, S.423-437

Massarsch K. R. (2002a)

Effects of Vibratory Compaction; International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction; Louvain-la-Neuve; 2002

Massarsch K. R., Fellenius B. H. (2002b)

Vibratory Compaction of Coarse-Grained Soils; Canadian Geotechnical Journal, Vol. 39, No. 3; 2002

Militzer H., Weber F. (1987)

Angewandte Geophysik: Seismik; Springer- und Akademie-Verlag, Berlin; 1987

Novak M. (1957)

Über die Nichtlinearität der Vertikalschwingungen von starren Körpern auf dem Baugrunde, Acta Technica Rocnik Bd. 2; 1957

Oumeraci H. (1994)

Wasserbauliches Versuchswesen I – Theoretische Grundlagen –, Leichtweiss-Institut für Wasserbau Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, TU Braunschweig; 1994

Pösch H., Ikes W. (1975)

Verdichtungstechnik und Verdichtungsgeräte im Erdbau; 2. Auflage, Ernst und Sohn Verlag, Berlin; 1975

Poteur M. (1971)

Beitrag zur Tauchrüttelung in rolligen Böden; Baumaschine und Bautechnik, 18. Jahrgang; 1971

Pregl O. (1998)

Handbuch der Geotechnik, Band 1. Eigenverlag des Inst. für Geotechnik der Univ. für Bodenkultur, Wien; 1998

Rogers A. A. (1979)

Vibrocompaction of cohesionless soils; Cementation Research Limited; International Report; 1979

Schmertmann J. H. (1987)

The mechanical aging of soil (The 25th Karl Terzaghi lecture), Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 11, p. 948; 1987

Schran U. (2003)

Untersuchungen zu Verschiebungen von Schlitzwänden beim Unterwasseraushub in Berliner Sanden, Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft 33, 2003

Seed H. B., Pyke R. M., Martin G. R. (1978)

Effect of Multidirectional Shaking on Pore Pressure Development in Sands, Journal of the Geotechnical Engineering Division, GTI, 13485, S. 27-44; 1978

Simons H., Kahl M. (1987)

Experimentelle Untersuchungen zur Verdichtung norddeutscher Sande mit Tiefenrüttlern; Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig; 1987

Studer J. A., Koller M. G. (1997)

Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme; 1997

Studer J. A., Ziegler A. (1986)

Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme; Berlin; 1986

Sun C., Lu Y. (1995)

Vibration Damping of Structural Elements; Prentice Hall PTR, 1995

Thorburn S. (1975)

Building structures supported by stabilized ground, Geotechnique 25; 1975

Tung S.-H. (2002)

Beitrag zur dreidimensionalen numerischen Berechnung der Wellenausbreitung und –abschirmung im elastischen Halbraum; Diss. RWTH Aachen, Lehrstuhl für Mechanik und Baukonstruktionen; 2002

Wehr W. J., Bergmann B., Turanyik J. (2005a)

Ausführung von Rüttelstopfsäulen bis in große Tiefe mit dem S- α -Schleusenrüttler-system für Kräne; in Schriftenreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Pfahl-Symposium 2005, TU Braunschweig; 2005

Wehr W. J. (2005b)

Variation der Frequenz von Tiefenrüttlern zur Optimierung der Rütteldruckverdichtung, Veröffentlichung des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 38, Vorträge zum 1. Hans Lorenz-Symposium; 2005

Wehr W. J., Sondermann (2003)

Deep Vibro Techniques, aus: Ground Improvement; 2003

Welsch P. (1987)

Soil improvement – a ten year update; Geotechnical Special Publication No. 12; American Society of Civil Engineers; 1987

Wolf J. (1994)

Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models; PTR Prentice-Hall; 1994

Normative Verweisungen**DIN 1311-1 (02-2002)**

Schwingungen und schwingungsfähige Systeme – Teil 1: Grundbegriffe, Einteilung

DIN 1311-2 (08-2002)

Schwingungen und schwingungsfähige Systeme – Teil 2: Lineare, zeitinvariante schwingungsfähige Systeme mit einem Freiheitsgrad

DIN 4094-3 (01-2002)

Felduntersuchungen – Teil 3: Rammsondierung

DIN 18123 (11-1996)

Bestimmung der Korngrößenverteilung

DIN 18125-1 (08-1997)

Bestimmung der Dichte des Bodens – T1: Laborversuche

DIN 18125-2 (08-1999)

Bestimmung der Dichte des Bodens – T2: Feldversuche

DIN 18126 (11-1996)

Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung

DIN EN 14731 (08-2003)

Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau), Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren

8 Symbole

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	[m]	Abstand
A	[m ²]	Querschnittsfläche
A	[m]	Schwingungsamplitude
A_1	[m]	Verschiebung im Aufhängepunkt des Rüttlers
A_2	[m]	Auslenkung der Rüttlerspitze
A_L	[m]	Amplitude in der Luft
A_Q	[m]	Amplitude an der Quelle
A_X	[m]	Amplitude im Abstand r von der Quelle
c	[kNs/m]	Dämpfung
c	[m/s]	Wellengeschwindigkeit
c	[%]	Dämpfungskoeffizienten
C	[-]	Krümmungszahl
c_g	[kNms]	Normierte Dämpfung für Verdrehung
c_c	[%]	Kritischen Dämpfung
c_L	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Love-Welle
c_p	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Druckwelle
c_R	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Welle
c_s	[m/s]	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle
c_x	[kNs]	Normierte Dämpfung
D	[-]	Dämpfungsgrad
d_{10}, d_{30}, d_{60}	[mm]	Korndurchmesser (Abszisse bei 10, 30, 60 Gew.-%)
D_{Pr}	[-]	Verdichtungsgrad nach Proctor
e	[-]	Porenzahl
E	[MN/m ²]	Statischer Elastizitätsmodul
E_d	[MN/m ²]	Dynamische Elastizitätsmodul
E_s	[MN/m ²]	Statischer Steifemodul
$E_{s,d}$	[MN/m ²]	Dynamischer Steifemodul
$E_{s,sek}$	[MN/m ²]	Dynamischer Sekantenmodul
E_{vib}	[MN/m ²]	Vibrationsmodul
f	[Hz], [1/s]	Frequenz
F	[kN]	Kraft
f_0	[Hz], [1/s]	Eigenfrequenz

Symbol	Einheit	Bezeichnung
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
G	[MN/m ²]	Schubmodul
G_d	[MN/m ²]	Dynamischer Schubmodul
G_{d0}	[MN/m ²]	Maximalwert des dynamischen Schubmoduls
i	[m]	Trägheitsradius
I_D	[-]	Bezogene Lagerungsdichte
I_f	[-]	Verdichtungsfähigkeit
k	[m/s]	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
k	[kN/m]	Federsteifigkeit
k_g	[kNm]	Normierte Federsteifigkeit für Verdrehung
k_0	[-]	Erdruchdruckbeiwert
k_x	[kN]	Normierte Federsteifigkeit
l	[m]	Länge
J_Θ	[kNm]	Massenträgheitsmoment
m	[kg]	Masse
$\max e$	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung
$\max n$	[-]	Porenanteil bei lockerster Lagerung
m_d	[g]	Trockenmasse
m_f	[g]	Masse der feuchten Probe
$\min e$	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung
$\min n$	[-]	Porenanteil bei dichtester Lagerung
m_r	[kg]	Rüttlermasse ohne Unwuchtmass m_u
m_u	[kg]	Rotierende Unwuchtmass
m_w	[g]	Masse des Wassers
M	[-]	Mittelpunkt
M_0	[kNm]	Statisches Moment
n	[-]	Porenanteil
n	[-]	Exponent
p	[kNm]	Elastische Bodenreaktionen
q	[m]	Auslenkung einer Schwingung aus der Mittellage
q	[kNm]	Viskose Bodenreaktionen
q_{\max}	[m]	Maximale Auslenkung der Schwingung
q_{\min}	[m]	Minimale Auslenkung einer Schwingung
r	[m]	Radius, Abstand
S	[-]	Schwerpunkt
S_r	[-]	Sättigungszahl
t	[s]	Zeit

Symbol	Einheit	Bezeichnung
t	[m]	Tiefe
T	[s]	Periodendauer
u_x, u_y, u_z	[m]	Verschiebung in x-, y-, z-Richtung
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
V	[cm ³]	Volumen
V	[-]	Vergrößerungsfaktor einer Amplitude
V_F	[cm ³]	Volumen der flüssigen Phase
V_G	[cm ³]	Volumen der gasförmigen Phase
V_{Korn}	[cm ³]	Kornvolumen
V_P	[cm ³]	Volumen der Poren
V_T	[cm ³]	Volumen der Festmasse
w	[%]	Wassergehalt
w_{Pr}	[%]	Optimaler Wassergehalt nach Proctor
W	[J]	Elastische Gesamtenergie des Systems
x	[m]	Auslenkung
x_S	[m]	Verschiebung des Schwerpunktes des Rüttlers
z	[m]	Tiefe
z_0	[m]	Abstand des Ruhepunktes des Rüttles
z_0^{real}	[m]	Abstand des realen Ruhepunktes
z_0^{theor}	[m]	Theoretischer Abstand des Ruhepunktes
z_f	[m]	Angriffspunkt der Fliehkraft
z_s	[m]	Abstand des Schwerpunktes

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	[°], [rad]	Phasenwinkel
α_S	[°], [rad]	Phasenwinkel der Verschiebung
α_ϑ	[°], [rad]	Phasenwinkel der Verdrehung
$\dot{\vartheta}$	[°/s], [rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
$\ddot{\vartheta}$	[°/s²], [rad/s²]	Winkelbeschleunigung
ϕ	[°], [rad]	Phasenwinkel der Bodenkraft
ϑ	[°], [rad]	Drehwinkel um den Schwerpunkt
θ	[°], [rad]	Winkel bei Auslenkung der Rüttlerspitze
φ	[°], [rad]	Innerer Reibungswinkel des Bodens
φ	[°], [rad]	Phasenwinkel der Unwuchtmasse
ψ	[-]	Dämpfungskapazität
γ	[-]	Schubverzerrung
δ	[-]	Logarithmische Dekrement
η_v	[-]	Verlustfaktor
η	[-]	Frequenzverhältnis
ν	[-]	Statische Querdehnzahl
ν_d	[-]	Dynamische Querdehnzahl
λ	[N/m²]	Lamé'sche Konstante
λ_R	[m]	Länge der Rayleigh-Welle
μ	[N/m²]	Lamé'sche Konstante
Ω	[Hz]	Kreisfrequenz, Erregerfrequenz
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	[-]	Dehnungen
ε_e	[-]	Elastische Dehnung
ρ_d	[g/cm³]	Trockendichte
ΔF_B	[MN]	Differenz der Bodenkontaktkraft
Δh	[m]	Absackung der Oberfläche
ΔW	[J]	Dissipierte Energie
Δx	[mm]	Differenz des Schwingwegs
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	[m]	Seitenlängen eines infinitesimalen Elements
ρ	[g/cm³]	Feuchtdichte
ρ_{Pr}	[g/cm³]	Proctordichte
ρ_s	[g/cm³]	Korndichte

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[MN/m ²]	Hauptnormalspannungen
σ_B	[MN/m ²]	Eingetragene Bodenspannung
σ_d	[MN/m ²]	Dynamischen Normalspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[MN/m ²]	Normalspannungen
τ	[MN/m ²]	Schubspannung
τ_d	[MN/m ²]	Dynamische Schubspannung
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	[MN/m ²]	Schubspannungen
ω	[Hz], [1/s]	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit
ω_0	[Hz], [1/s]	Eigenkreisfrequenz
ω_d	[Hz], [1/s]	Eigenfrequenz des gedämpften Systems
ω_x	[Hz], [1/s]	Eigenfrequenz für die Verschiebung
ω_ϑ	[Hz], [1/s]	Eigenfrequenz für die Verdrehung

Abkürzungen

MRC	Müller Resonance Compaction
RDV	Rütteldruckverfahren
RSV	Rüttelstopfverfahren
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik